



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

VALIDAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE UMA BALANÇA TERMOGRAVIMÉTRICA PRESSURIZADA

Por,
Bruno Rodrigues da Rocha

Brasília, 28 de Junho de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

VALIDAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE UMA BALANÇA TERMOGRAVIMÉTRICA PRESSURIZADA

POR,

Bruno Rodrigues da Rocha

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Armando A. Caldeira-Pires, UnB/ENM
(Orientador)

Dr. Patrick L. A. Rousset, CIRAD (Co-Orientador)

Prof. Carlos A. Gurgel V., UnB/ENM

Brasília, 28 de Junho de 2012

Dedicatória

Dedico esse trabalho, primeiramente aos meus pais, Miguel e Glória, que sempre foram os primeiros a me dar apoio e incentivo às minhas escolhas. Dedico também à minha irmã, Simone, pelos inúmeros conselhos e pela paciência que só os irmãos mais velhos têm. E não poderia esquecer a minha namorada, Suyane, companheira e conselheira nessa etapa tão importante de minha vida.

Bruno Rodrigues da Rocha

Agradecimentos

Meus agradecimentos ao Patrick Rousset por ter aberto as portas do LPF para que pudesse realizar meus estudos, ao professor Armando Caldeira por ter me orientado, à todos os que trabalharam comigo no laboratório, Alessandro e Lucélia pela ajuda e companhia nos mais diversos momentos e Mário pelos grandes ensinamentos, ao amigo e sócio Iúry por ter sido grande companheiro e tutor neste projeto. Agradeço também aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília pelo profissionalismo e conhecimento repassado. À secretaria da ENM, pelo cordialismo, eficiência e respeito. Aos grandes companheiros de curso que, juntos, conseguimos concluir esta nova etapa. E a todos os que me apoiaram indiretamente e que terei o prazer de agradecer pessoalmente. Enfim, meus sinceros agradecimentos.

Bruno Rodrigues da Rocha

RESUMO

Tendo em vista a crescente busca pelo aumento da eficiência nos processos de carbonização e da demanda dos produtos gerados por ele pelas indústrias brasileiras, em sua maior parte as siderúrgicas, fica claro que um estudo mais aprofundado faz-se necessário. Assim, espera-se que se tenha uma maior capacidade e conhecimento, a fim de se produzirem produtos com maior qualidade e eficácia. Baseada nessa motivação foi construída uma Balança Termogravimétrica (TG) pressurizada de grande escala (partículas > 200g), pois já se sabe que a pressão, em “micro TGs”, é um importante fator no processo. O presente projeto é a segunda etapa da idealização dessa “macro” Balança Termogravimétrica e consiste na validação, instrumentação e automação do equipamento. Ao final do trabalho, o equipamento deverá trabalhar em todos os regimes a que foi proposto, fornecendo uma curva de decaimento de massa da amostra, por meio de uma interface de controle e aquisição de dados simples, sendo capaz de gerar resultados confiáveis para o estudo da influência de diferentes fatores no processo de pirólise.

ABSTRACT

Considering the growing demand by increasing efficiency in the processes of carbonization and the demand of the products generated by it by Brazilian industries, mostly steel companies, it is clear that further study is needed. Thus, it is expected to have a greater capacity and knowledge to produce products with higher quality and effectiveness. Based on this motivation, was built a Pressurized Thermogravimetric Balance (TG) in large-scale (particles > 200g), as it's known that the pressure on "micro TGs" is an important factor in the process. This project is the second step of the idealization of a "macro" TG and consists in validation, instrumentation and automation of the equipment. At the end of the work the equipment should work on all regimes that were proposed, providing a decay curve of the sample, through a easy control interface and data acquisition, being able to generate trustworthy results for the study of the influence of different factors in the carbonization process.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 ANÁLISE TÉRMICA.....	2
2.1.1 Conceitos iniciais	2
2.1.2 Termogravimetria (TG).....	3
2.2 CENÁRIO ATUAL DOS FORNOS SOB PRESSÃO	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 EQUIPAMENTO.....	12
3.1.1 Câmara de medição.....	14
3.1.2 Trocador de calor	15
3.1.3 Reator.....	16
3.1.4 Resistência elétrica.....	18
3.1.5 Cesto de biomassa.....	19
3.1.6 Base do equipamento	20
3.2 METODOLOGIA DE ENSAIO	21
3.3 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE.....	23
3.3.1 Linha de temperatura	23
3.3.2 Linha de pressão.....	24
3.3.3 Linha de massa.....	28
3.3.4 Linha de automação e controle	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 LINHA DE TEMPERATURA	40
4.1.1 Isolamento térmico.....	40
4.1.2 Posicionamento dos termopares.....	45

4.2 LINHA DE PRESSÃO	49
4.3 LINHA DE MASSA	52
5 CONCLUSÕES	54
6 SUGESTÕES.....	55
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
ANEXOS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais técnicas termo analíticas	2
Figura 2. Curva TG (em vermelha) e sua derivada DTG (em azul).....	4
Figura 3. Detalhe de uma balança termogravimétrica	6
Figura 4. Posicionamento do forno em relação à balança B	7
Figura 5. Posicionamento do termopar	7
Figura 6. Esquema montagem do reator CIRAD (Numazawa, 2000)	11
Figura 7. Reator CIRAD (Numazawa, 2000).....	11
Figura 8. Representação do equipamento (Colatto, 2011).....	13
Figura 9. Representação esquemática da balança termogravimétrica (Colatto, 2011)	14
Figura 10. Corte explodido da Câmara de Medição	15
Figura 11. Trocador de calor.....	16
Figura 12. Vista explodida do reator (Colatto, 2011)	17
Figura 13. Sistema de abertura do reator (Colatto, 2011)	18
Figura 14. Resistência elétrica (Colatto, 2011).....	19
Figura 15. Cesto de biomassa e cabo de aço para comunicação (Colatto, 2011).....	20
Figura 16. Estrutura da base da balança (Colatto, 2011)	20
Figura 17. Cilindro de gás nitrogênio	24
Figura 18. Válvula redutora de pressão.....	25
Figura 19. Válvula de saída Fechada (1) e Aberta (2)	26
Figura 20. Válvula solenóide	26
Figura 21. Linha de pressão	27
Figura 22. Linha de pressão. (1) Cilindro de N ₂ ; (2) Válvula redutora; (3) Válvula solenoide; (4) Reator; (5) Válvula de saída; (6) Termopar; (7) Indicador de pressão; (8) Válvula de segurança. .	28
Figura 23. Célula de carga e seu alinhamento com o cesto de biomassa	29
Figura 24. Prensa - Cabos	30
Figura 25. Estrutura de funcionamento de um CLP.....	32
Figura 26. Representação esquemática de (a) malha aberta e (b) malha fechada	33

Figura 27. Controlador PID NOVUS N1200.....	34
Figura 28. Controlador PID	34
Figura 29. Efeito do controle proporcional.....	35
Figura 30. Efeito do controle (a) sem PI e (b) com PI	36
Figura 31. Efeito do controle (a) sem PD e (b) com PD	37
Figura 32. Transmissor de pressão.....	37
Figura 33. Termopar tipo k	38
Figura 34. Posicionamento do termopar do (a) reator e (b) da resistência.....	40
Figura 35. Teste de aquecimento e comportamento térmico	41
Figura 36. Teste de aquecimento 5°C/min.....	41
Figura 37. Isolamento térmico	42
Figura 38. Teste de aquecimento 5°C/min com reator isolado	43
Figura 39. Teste N°1 (referência Tabela 3).....	44
Figura 40. Teste N° 22 (referência Tabela 4).....	44
Figura 41. Posicionamento dos termopares original	45
Figura 42. Zonas térmicas.....	46
Figura 43. Teste N° 18 com posicionamento original dos termopares	46
Figura 44. Reposicionamento do termopar de controle	47
Figura 45. Teste N° 18.2 com reposicionamento dos termopares.....	48
Figura 46. Colocação da junta isolante. Antes (a) e depois (b).....	48
Figura 47. Teste com isolamento na tampa superior do reator	49
Figura 48. Esquema montagem da linha de pressão	50
Figura 49. Esquema do sistema de pressurização (Colatto, 2011).....	51
Figura 50. Teste N° 6 decaimento de massa percentual.....	52
Figura 51. Teste N° 18 decaimento de massa percentual e temperatura do reator	53
Figura 52. Célula de carga após realização de ensaios	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Influência da pressão na carbonização da madeira (Rousset, 2005)	9
Tabela 2. Influência da pressão sobre o conteúdo energético final (Rousset, 2009)	9
Tabela 3. Parâmetros para realização dos testes do ciclo 1.....	21
Tabela 4. Parâmetros para realização dos testes do ciclo 2.....	22
Tabela 5. Caracterização das variáveis para cada tipo de ensaio	22

1 INTRODUÇÃO

A Termogravimetria ou TG é uma técnica de análise térmica que pode ser usada para o estudo do processo de decomposição térmica da biomassa (Sun, Xiong, Liu, & Zhang, 1997). A TG tem como princípio o monitoramento da variação de massa da amostra em estudo, em relação à programação controlada da temperatura e do tempo. Com o conhecimento de como se dá a degradação térmica, é possível melhorar, por exemplo, a eficiência em um processo de pirólise.

Existem inúmeros tipos de equipamentos para a realização dessas análises, os quais apresentam uma composição básica. Um forno, uma balança e sensores são fundamentais para o funcionamento de todos eles. Porém, a capacidade de carga dessas balanças está limitada à ordem de microgramas. Nessa escala, um aumento na temperatura do forno implicará, simultaneamente, no mesmo aumento da temperatura da amostra como um todo. Ou seja, não existe um gradiente de temperatura entre a superfície e o interior da amostra.

Alguns desses equipamentos se diferem pelo fato de trabalharem com um ambiente pressurizado. Estudos realizados (Rousset, 2005) tem mostrado que, de fato, a pressão tem influencia nesse tipo de análise.

Não se tem conhecimento de estudos referentes a equipamentos que façam uso de uma grande quantidade de massa, com grandes precisões. (Capacidade de 250g e precisão de 0,5g). A importância de se avaliar equipamentos com essa ordem de grandeza seria a sua aproximação mais realista de processos industriais. Diferentemente de se utilizar pequenas quantidades de amostra, uma massa maior implica em um gradiente de temperatura entre a parte externa e o seu interior.

Esse trabalho propõe-se a validar uma balança termogravimétrica de grande escala, onde a capacidade de carga da balança será da ordem de centenas de gramas, com precisão de 0,01g até 0,5g (dependendo da célula de carga). Além disso o ambiente será pressurizado com precisão de até 0,1 bar. O desafio será obter pleno controle sobre os diferentes parâmetros de temperatura, pressão e massa, garantindo um funcionamento confiável e seguro, ou seja, repetitividade dos ensaios. Isso permitirá que primeiros estudos em uma máquina dessas proporções possam ser realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE TÉRMICA

2.1.1 Conceitos iniciais

Para se ter um conhecimento mais aprofundado do que ocorre, de fato, em processos de carbonização ou até mesmo outros processos de aproveitamento da biomassa, é fundamental fazer uma análise térmica dos produtos obtidos. Essa análise é muito abrangente e existem diversas técnicas que podem ser utilizadas.

Em geral a utilização dessas técnicas relaciona uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, e a monitora em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, em um meio controlado, é submetida a uma programação controlada.

Desta forma a análise térmica tem um campo de atuação bem vasto e voltado ao estudo de processos de catálise e corrosões, propriedades térmicas e mecânicas, diagrama de fases e transformações. No diagrama abaixo, são relacionadas algumas das principais técnicas termo-analíticas.

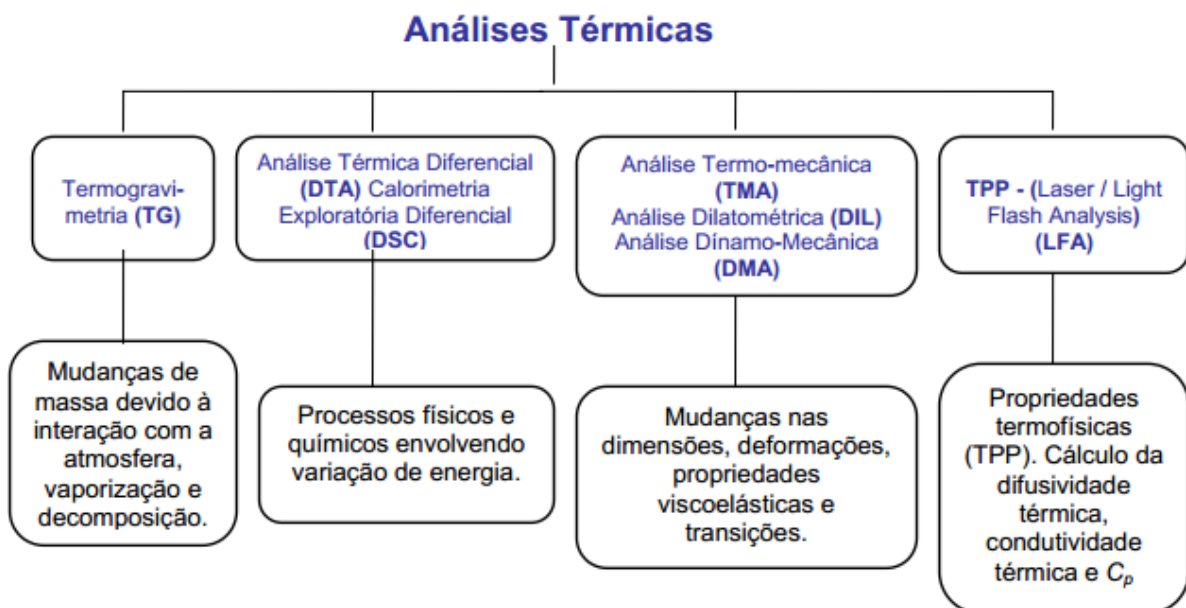


Figura 1. Principais técnicas termo analíticas

No contexto desse trabalho, a análise Termogravimétrica terá um destaque maior por ser o objeto de estudo em questão, e por isso suas características e condições de contorno serão abordadas com mais detalhes e informações.

2.1.2 Termogravimetria (TG)

- **Histórico**

O desenvolvimento da balança termogravimétrica moderna foi impulsionado pela determinação do raio de estabilidade de vários precipitados utilizados na análise química gravimétrica. Este aspecto teve seu ápice sob Duval (1963), que estudou mais de mil desses precipitados e desenvolveu um método analítico automatizado baseado na TG.

Honda (1915) levou a posterior fundação da moderna TG quando, utilizando uma “termobalança”, conclui suas investigações em alguns componentes químicos dizendo “Todos os resultados dados não são inteiramente originais; a presente investigação da termobalança tem, entretanto, revelado a exata posição da mudança da estrutura e também da velocidade das mudanças nas respectivas temperaturas”.

Outras TGs vêm sendo desenvolvidas, utilizando-se de eletrobalanças para uma maior precisão na ordem de 0,1µg. O desafio é construir balanças que atendam aos mais diversos parâmetros, com uma maior flexibilidade e abrangência no controle da atmosfera dos ensaios.

- **Definição**

A Termogravimetria (TG) é uma técnica de análise térmica que pode ser usada para o estudo do processo de produção de carvão (Sun, Xiong, Liu, & Zhang, 1997). A TG tem como princípio o monitoramento da variação de massa, da amostra em estudo, em relação à programação controlada da temperatura e do tempo.

O caráter específico de uma sequência de reações físico-químicas que ocorrem em certas condições de temperatura, e em dada velocidade, são características de um determinado composto ou sistema, dando assim origem a curvas (termogramas) particulares. As variações de massa podem dar-se graças à ruptura ou formação de ligações, à liberação ou à absorção de produtos voláteis, à pirólise ou à formação de produtos mais pesados. Por este motivo, as curvas termogravimétricas podem fornecer dados valiosos para o estudo da termodinâmica e da cinética de transformações.

As análises termogravimétrica e termodiferencial (DTG) têm sido frequentemente usadas nos estudos de decomposição térmica da madeira. A análise termogravimétrica mostra como a madeira se comporta quando aquecida, sendo possível verificar em que temperatura é iniciada a decomposição térmica e, ainda, em que faixa de temperatura a decomposição térmica é mais pronunciada. A análise termodiferencial torna possível a identificação dos picos e/ou das faixas de ocorrência das reações endotérmicas e exotérmicas do processo. As duas curvas podem ser observadas no gráfico a seguir.

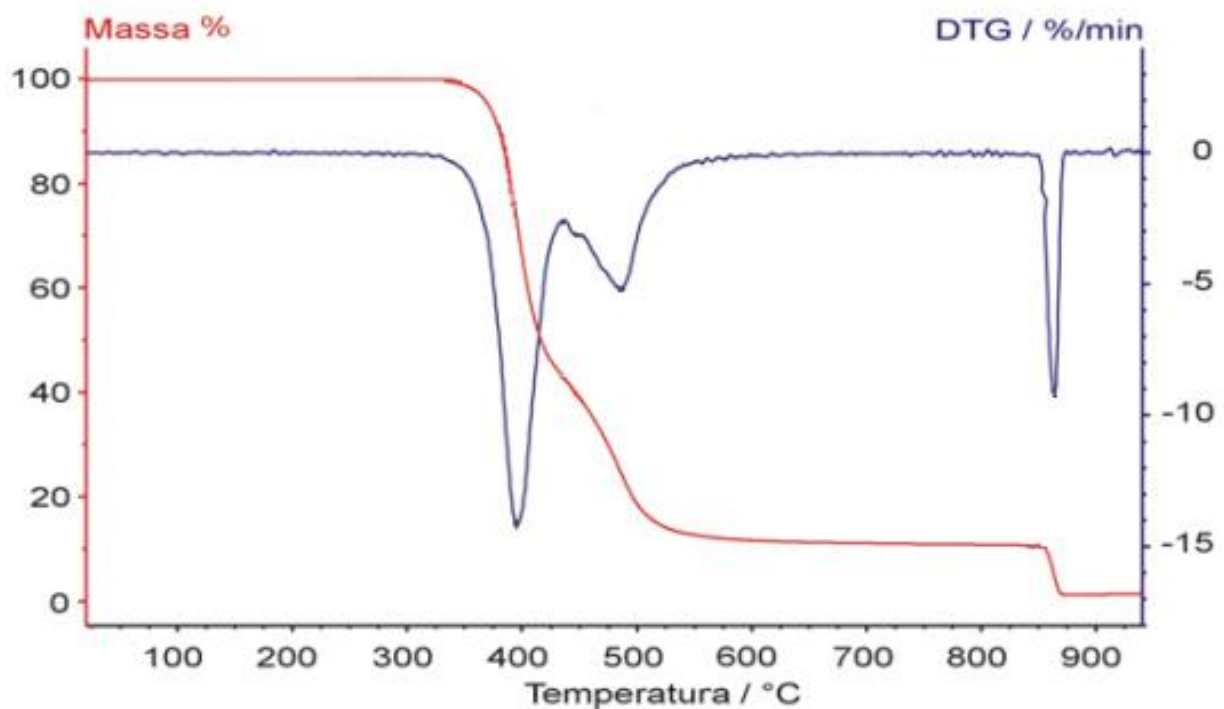


Figura 2. Curva TG (em vermelha) e sua derivada DTG (em azul)

Observa-se que a ordenada é dada em porcentagem de massa ao invés da massa propriamente dita, facilitando a comparação entre diversas curvas e permitindo uma maior interpretação inicial do que ocorre durante todo o processo. Paralelamente a esse gráfico poderá ser exibido a temperatura em função do tempo, permitindo o controle da taxa de aquecimento e verificando a sua influência no processo de carbonização.

- **Aplicações da TG**

As aplicações da Termogravimetria são bastante variadas, sendo as principais:

- Calcinação e torrefação de minerais;
- Corrosão de materiais em várias atmosferas;
- Curvas de adsorção e desadsorção;
- Degradação térmica oxidativa de substâncias poliméricas;
- Desenvolvimento de processos gravimétricos analíticos (peso constante);
- Decomposição térmica ou pirólise de materiais orgânicos, inorgânicos e biológicos;
- Determinação da umidade, volatilidade e composição de cinzas;
- Estudo da cinética das reações envolvendo espécies voláteis;
- Reações no estado sólido que liberam produtos voláteis;
- Taxas de evaporação e sublimação;
- Decomposição de materiais explosivos;
- Propriedades magnéticas como temperatura Curie e suscetibilidade magnética;
- Identificação de polímeros novos, conhecidos e intermediários;
- Estudo da desidratação e estudo da higroscopicidade.

- **Equipamento**

Existem inúmeros tipos de equipamentos para a realização de análises termogravimétricas, havendo uma composição básica para todos eles. A seguir serão mostrados, de maneira bem simplificada, os componentes básicos de um forno TG.

Os equipamentos são fundamentalmente compostos por uma balança (que pode ser da ordem de 1µg até centenas de gramas), um forno, termopares para o controle e um sistema de fluxo de gás.

Os equipamentos de termogravimetria variam muito de tipo, qualidade, sensibilidade, precisão e exatidão. Contudo, de forma genérica podem ser descritos por acoplamento de um forno onde fica o cadinho, no qual se coloca a amostra, e que através de um suporte, ou sistema de suspensão, é acoplado a um sistema de medida de massa (balança). As pesagens podem ser feitas por um elemento sensor que detecta qualquer desvio do travessão que constitui o braço da balança (como feixes luminosos atingindo fotocélulas, por exemplo) (Willard, 1974; Heal, 2002). Outra forma de detecção da variação de massa dá-se pela contração ou pelo alongamento de uma mola helicoidal de precisão, cujo movimento é transmitido ao núcleo de um transformador diferencial (Willard, 1974).

Outra variante é a quantidade da amostra, que nos primórdios da Termoanálise giravam em torno de 1g, enquanto atualmente vão de 1 a 100 mg. A vantagem de se usarem pequenas massas de amostras é que a distribuição do calor se faz mais rapidamente e melhor, atingindo de maneira mais uniforme os corpos analisados. Porém, o escopo do projeto vai contra a utilização de pequenas quantidades de massa. A capacidade projetada do equipamento em estudo gira em torno dos 250 gramas. O estudo em uma máquina com maiores proporções leva a novos desafios, já que não poderá ser considerada uma distribuição uniforme de calor nos corpos analisados.

A Fig.(3) detalha a posição desses componentes, lembrando que as características específicas de cada um deles dependem da aplicação requerida.

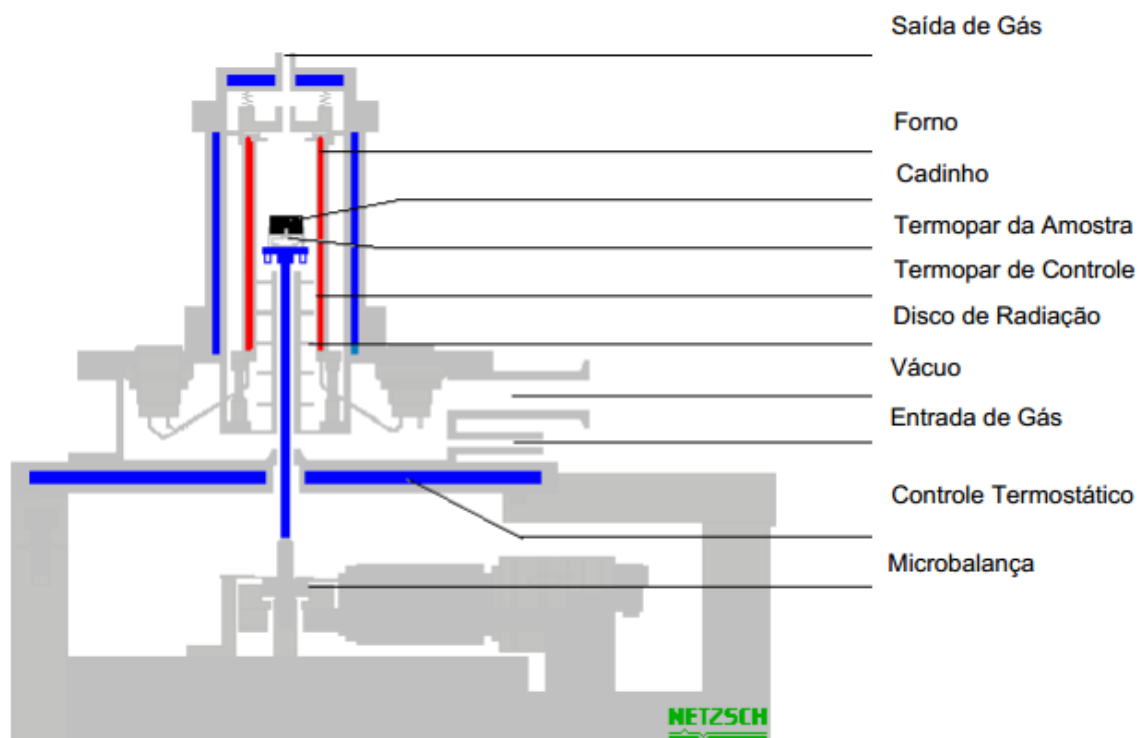


Figura 3. Detalhe de uma balança termogravimétrica

- Forno → deverá ser capaz de operar na faixa de temperatura estipulada para cada caso, mantendo suas características ao longo dos ensaios e garantindo um funcionamento constante. Alguns cuidados deverão ser tomados quanto à resistência térmica de componentes próximos ao forno para que não sejam danificados.

Outra característica importante do forno é a sua posição em relação à balança, podendo ser abaixo, acima ou paralelo conforme Fig. (4). A escolha da posição dependerá das limitações do projeto em termos de espaço e custo.

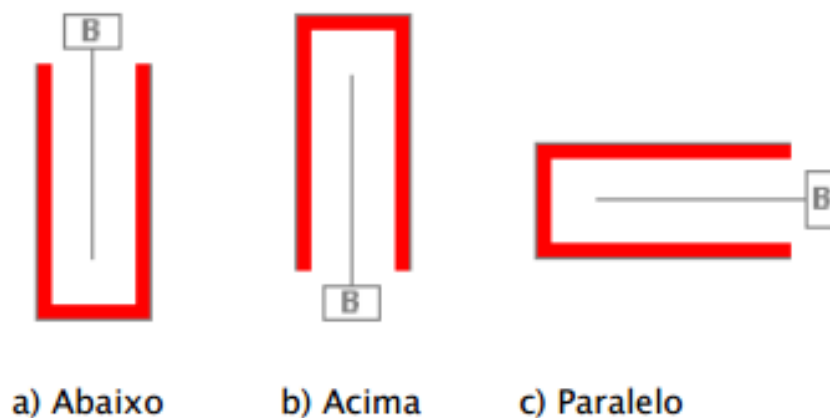


Figura 4. Posicionamento do forno em relação à balança B

- Programador de temperatura → equipamento fundamental para o controle das taxas de aquecimento do forno, garantindo precisão e um aumento linear de temperatura no interior do forno. Existem diversos equipamentos para essa função, que serão detalhados na parte técnica do presente trabalho.

- Termopar → é o dispositivo usado para a aferição da temperatura. Deverá estar em contato direto com a atmosfera do forno. Dependendo do seu posicionamento Fig. (5), podem-se obter leituras diferentes e por isso deve ficar claro, nas especificações do projeto, onde colocá-lo.

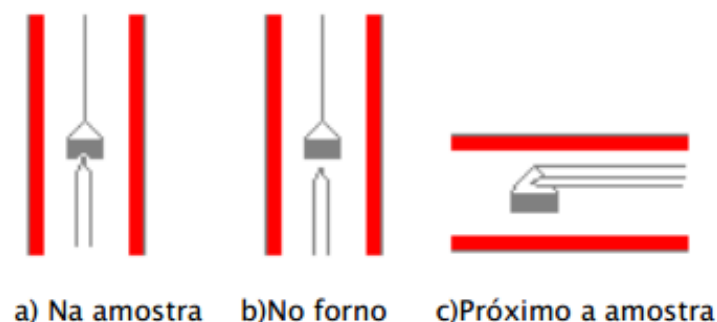


Figura 5. Posicionamento do termopar

- Balança → a balança será o instrumento utilizado para medir a variação da massa da amostra ao longo do tempo e temperatura. Por trabalhar em um ambiente com condições específicas de temperatura e atmosfera deverá ser capaz de manter a sua precisão e funcionamento sem afetar os resultados finais. A escolha do tipo de balança (eletromagnética, célula de carga) e do posicionamento dentro do equipamento deve ser feitos com bastante cuidado, levando-se em consideração esses aspectos.

- Cadinho → é o recipiente onde a amostra será depositada. Deverá suportar as temperaturas de trabalho de cada equipamento em específico, não apresentando rachaduras ou até mesmo a sua quebra dentro do forno. Podem ser de platina, alumina, quartzo, vidro, entre outros materiais que devem suportar as temperaturas de trabalho.

- **Influência da pressão em análises térmicas**

Assim, com uma breve explicação do funcionamento desse tipo de análise térmica e também da utilização de cada componente constituinte, é possível fazer um estudo mais profundo, considerando-se outro fator, a pressão.

Paralelamente ao estudo de degradação térmica em função do material utilizado, da taxa de aquecimento, da atmosfera no interior do equipamento, é possível variar outros fatores que podem modificar uma curva característica daquele material. O estudo da influência da pressão em processos de degradação térmica, especificamente na carbonização de biomassa, está se tornando cada vez mais comum, visto que existem, realmente, modificações nesses processos.

Estudos demonstram que a pressão é um fator que tem efeito direto sobre o aumento de massa do carvão em detrimento da formação de líquido durante o processo de conversão termoquímica da madeira. Constata-se que substâncias com potencial de liquefação ficam retidas no interior do carvão devido à pressão, sofrendo um fenômeno de coqueificação. Assim é verificado um acúmulo de matéria sólida no carvão (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Além disso, o fluxo de gás durante o processo está relacionado com o rendimento gravimétrico na medida em que, quanto maior for esse fluxo, menor será o rendimento encontrado (Antal & Mol, 1990 e Antal, 2003). Estudos recentes mostram que a variação da pressão afeta as frações de combustível obtido, como pode ser verificado a seguir (Rousset, 2005).

Tabela 1. Influência da pressão na carbonização da madeira (Rousset, 2005)

Produtos	Pressão (1 bar)	Pressão (> 4 bar)	Pressão (0,5 bar)
Fração Líquida(%)	30 – 35	25 - 30	60 - 65
Fração Gasosa(%)	25 – 30	20 - 25	15 - 20
Fração Sólida (%)	20 – 35	30- 45	15 - 20

Tabela 2. Influência da pressão sobre o conteúdo energético final (Rousset, 2009)

Produtos da Pirólise em % da energia inicial	Flash	Carbonização atmosférica	Carbonização sob pressão
Líquido	70	20	20
Gás	5	25	5
Sólido	25	55	75

Adiante será exposto como o estudo de balanças termogravimétricas pressurizadas está ganhando espaço nos mais diversos centros de pesquisas e como se deu a concepção e validação do projeto proposto.

2.2 CENÁRIO ATUAL DOS FORNOS SOB PRESSÃO

O estudo da influência da pressão nos processos de carbonização e de pirólise é relativamente recente e teve sua importância reconhecida somente na década de 80, com os estudos do pesquisador Michael Antal, da Universidade do Havaí. Alguns trabalhos de pirólise sob pressão mostram uma tendência de aumento do rendimento de sólidos nesse processo. Alguns resultados preliminares já foram obtidos, com rendimentos variando entre 41 e 62% o que está bem acima dos valores dos sistemas com pirólise à pressão atmosférica que variam entre 25 e 37%.

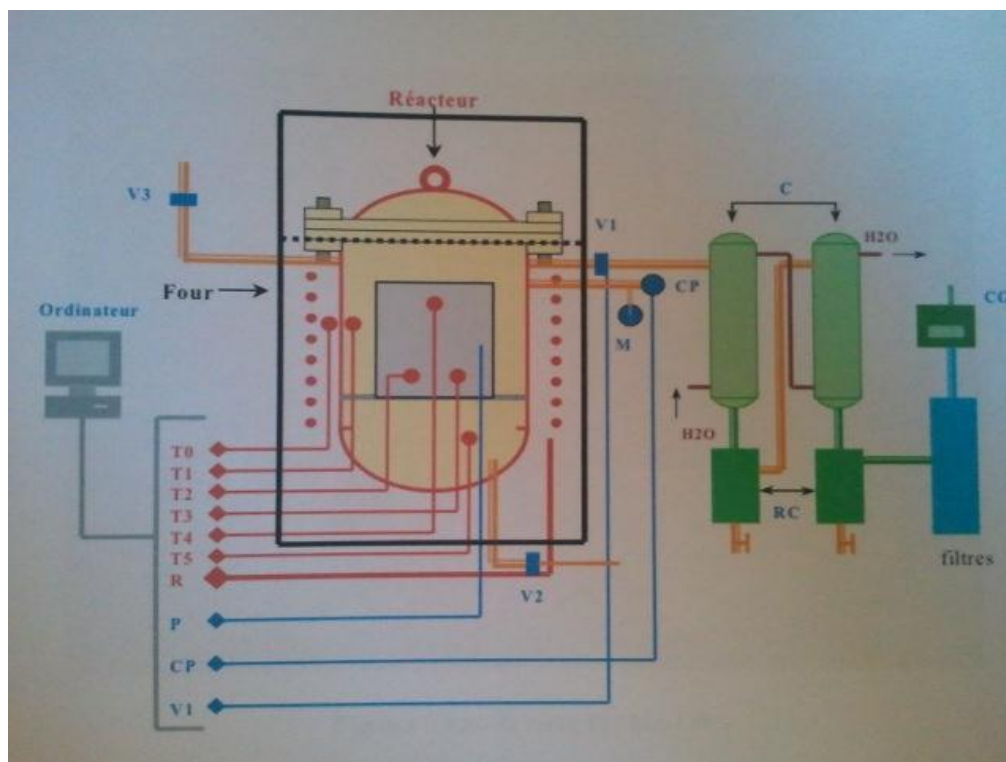
Esses valores representam um aumento de 148% na obtenção de sólidos no processo de pirólise (Antal *et al*, 1996). É importante salientar que esses resultados não mostram um aumento da qualidade do carvão, simplesmente que a obtenção de resíduos sólidos é maior em uma atmosfera pressurizada. Estudos posteriores de Antal, em 2000, mostraram a partir de uma análise imediata, um pequeno ganho na qualidade do carvão produzido.

Atualmente os fornos sob pressão se concentram apenas em laboratórios, onde constantes estudos e implementações são realizados com o objetivo de torná-los fornos industriais confiáveis e rentáveis para a produção de carvão com alta qualidade e rendimento. Alguns fornos importantes e pioneiros nesse estudo serão apresentados a seguir.

Reator da University of Hawai 1, EUA, consiste de dois micro reatores de aço 316 com 4,64mm de diâmetro interno capaz de suportar pressões de trabalho de até 25 bar e temperaturas de aproximadamente 800 °C, com rampas de aquecimento de até 20 °C/min (Antal & Mok, 1983).

Reator PDU University of Hawai 2, EUA, consiste em um reator de maiores proporções com grande capacidade de carga de biomassa. Consiste de um grande cilindro de aço com 250mm de diâmetro interno e 1630mm de altura, com pressões de trabalho de até 7bar e temperaturas de aproximadamente 350°C. O sistema é aquecido por resistências elétricas e pela queima dos próprios gases oriundos da pirólise da biomassa (Antal & Mok, 1983).

Reator Cirad, França, consiste em um reator com volume de aproximadamente 0.2 m³, capaz de suportar pressões de trabalho de até 10 bar e temperatura máxima de 600 °C com rampa de aquecimento de até 10 °C/min. A pressão é conseguida pela adição de gás inerte no interior do tubo controlado por uma válvula na saída e um regulador de pressão na entrada do equipamento. O sistema de aquisição de temperatura é feito através de 6 pontos distintos do reator, fornecendo dados mais precisos do comportamento de todo o processo de pirólise (Numazawa, 2000).



3 MATERIAIS E MÉTODOS

O começo do estudo desse equipamento se deu em 2010, no Laboratório de Produtos Florestais – LPF, e o seu desenvolvimento e construção tornou-se tema de Projeto de Graduação da Universidade de Brasília pelo estudante Iúry Vinícius Winckler Colatto. Tendo o equipamento sido montado em meados de 2011, restou-se fazer toda uma análise de desempenho, a fim de validá-lo, e essa segunda etapa tornou-se tema do presente projeto.

A partir dos conceitos iniciais trabalhados na revisão bibliográfica, os capítulos seguintes tratarão do desenvolvimento técnico do projeto, apresentando uma abordagem mais detalhista do equipamento e seus periféricos. Problemas e soluções encontrados no decorrer do estudo serão abordados e, por fim, uma análise conclusiva será levantada.

3.1 EQUIPAMENTO

É importante, primeiramente, ter uma visão geral de como o equipamento funciona para que seja possível escolher a maneira mais eficiente de controlar e adquirir todas as informações e parâmetros de trabalho, garantindo confiabilidade e segurança em seu funcionamento.

A Fig. (8) é um desenho representativo da montagem final da balança. É possível observar com maiores detalhes a disposição dos diferentes elementos constituintes. A câmara de medição fixada por flange FF (*full face*) ao condensador, que por sua vez é fixada por meio de um flange RF (*raised face*) ao reator. Percebem-se as hastes guias, bem como a ponte para içamento e suas roldanas. Com uma visão geral da máquina, é importante caracterizar cada componente separadamente, a fim de se ter um conhecimento específico de cada constituinte e fazer as indagações necessárias, para se obter um bom sistema de medição e controle.

É importante citar que todo o projeto feito levou em consideração os parâmetros necessários para a realização de experimentos de pirólise e até mesmo de secagem de biomassa. Os materiais foram escolhidos de modo a resistirem às condições adversas de grande variação de temperatura, com atmosfera, no interior do forno, bastante corrosiva. Todas as especificações e maiores detalhes construtivos podem ser encontrados no Projeto de Graduação 2 “Desenvolvimento de uma termobalança pressurizada para testes de carbonização da madeira” de Iúry V.W. Colatto.

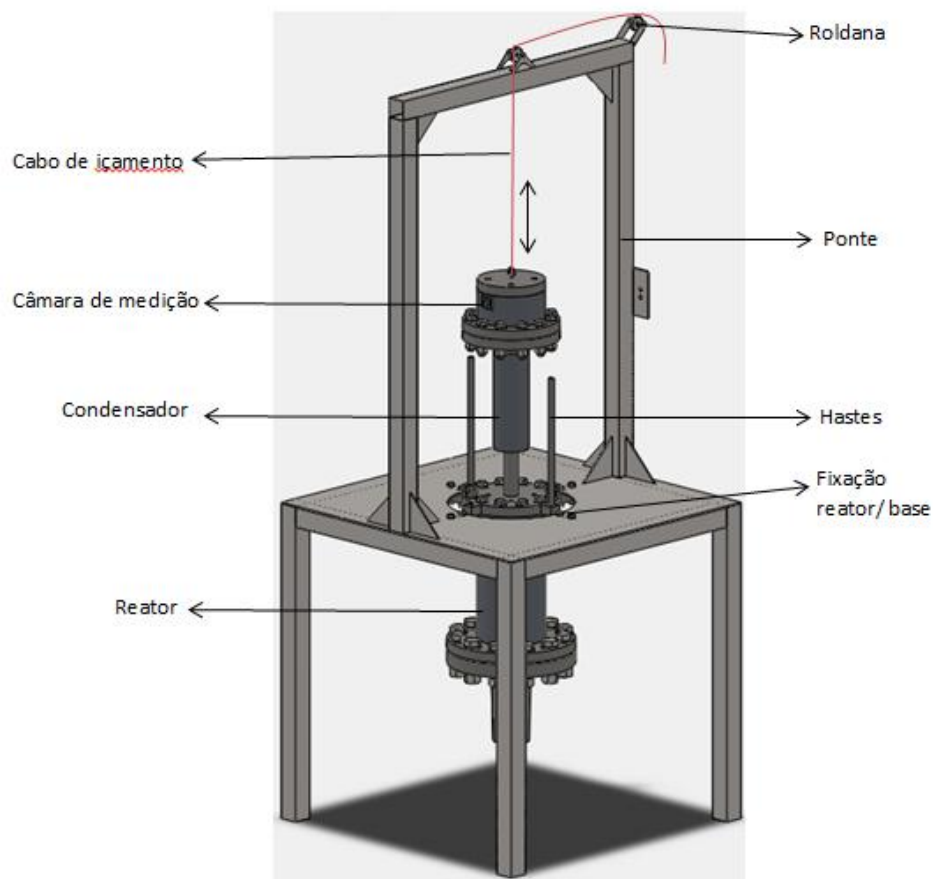


Figura 8. Representação do equipamento (Colatto, 2011)

Assim, foi proposto o equipamento mostrado de maneira esquemática na Fig. (9).

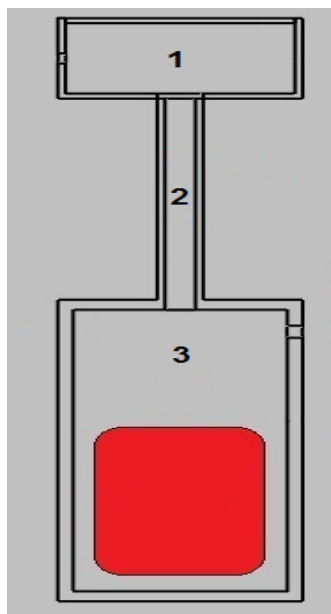


Figura 9. Representação esquemática da balança termogravimétrica (Colatto, 2011)

A TG é composta por 3 seções distintas. A primeira é a câmara onde será alocada a célula de carga para medição da variação de massa durante o processo de carbonização. A segunda seção é o condensador de gases gerados nas reações químicas/elemento estrutural de ligação entre as outras 2 seções e, por fim, a terceira é o reator de pirólise propriamente dito.

Para fins de nomenclatura, a seção 1 será chamada de Câmara de Medição, a seção 2, de Trocador de Calor, e a seção 3, de Reator.

3.1.1 Câmara de medição

A câmara de medição é a parte do equipamento onde será fixada a célula de carga para medição da variação de massa ao longo do processo. Por ser um equipamento mais sensível, decidiu-se isolar a célula de carga da atmosfera agressiva do reator e das temperaturas elevadas. Essa foi projetada para que a temperatura em seu interior não ultrapassasse os 50°C e para que fosse evitada ao máximo a subida de gases provenientes da carbonização da biomassa. O fato de se localizar distante do reator, ligado por um tubo trocador de calor, diminui consideravelmente

a transferência de calor por condução e a contaminação pelos gases quentes, já que são condensados ao longo do tubo.

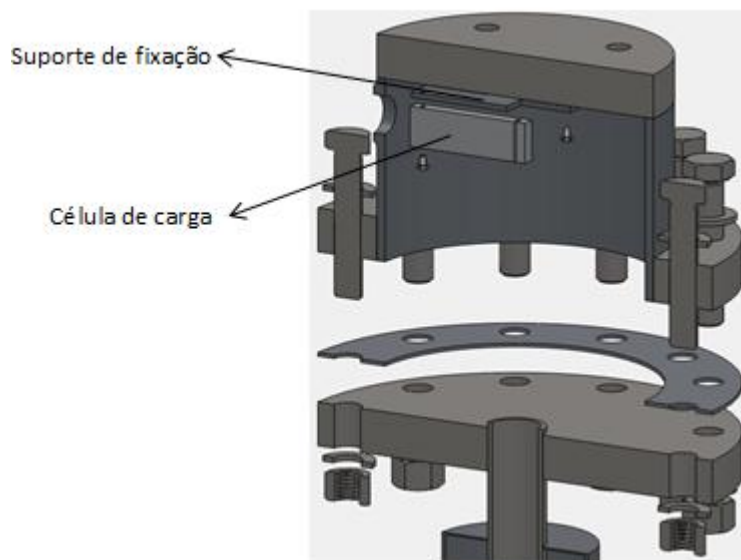


Figura 10. Corte explodido da Câmara de Medição

Na Fig. (10) tem-se um corte explodido da câmara de medição mostrando onde a célula de carga está posicionada, auxiliado por um suporte de fixação. É mostrada também a fixação da câmara de medição com o trocador de calor através de um flange FF parafusada.

3.1.2 Trocador de calor

A seção 2 do equipamento, que foi chamada de Trocador de Calor, exerce duas funções. A primeira delas é estrutural, pois é a ligação entre a câmara de medição e o reator por meio de um flange do tipo face plana ou *Flat Face* (FF) em ambas as extremidades. A outra função é a de condensador. Formado por um duplo tubo, pode ser percorrido por água corrente por meio de duas aberturas, superior e inferior, evitando que condensáveis atinjam a câmara de medição e danifiquem a célula de carga. E também ameniza a transferência de calor por condução por estar sempre resfriado pela passagem de água corrente. Na Fig. (11) é possível ver os elementos constituintes do trocador de calor.

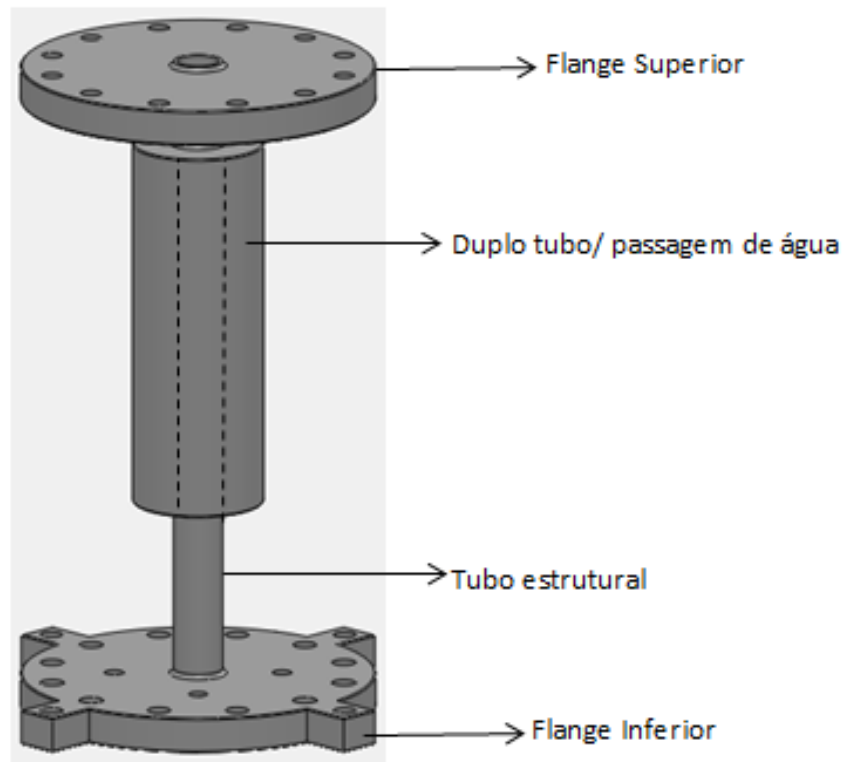


Figura 11. Trocador de calor

3.1.3 Reator

O reator é a câmara onde todo o processo se desenvolverá. É nele que se encontra a resistência elétrica que fornece calor necessário às reações e onde a biomassa é colocada. É importante salientar que as perdas de calor nessa parte do equipamento deverão ser as menores possíveis, a fim de que se tenha uma temperatura constante ao longo do tempo. Portanto deverá ser escolhida uma maneira eficiente de se isolar, termicamente, o reator. Outro fator importante do isolamento térmico ser feito de maneira eficiente é que a resistência elétrica será menos exigida quando todo o sistema atingir um regime permanente.

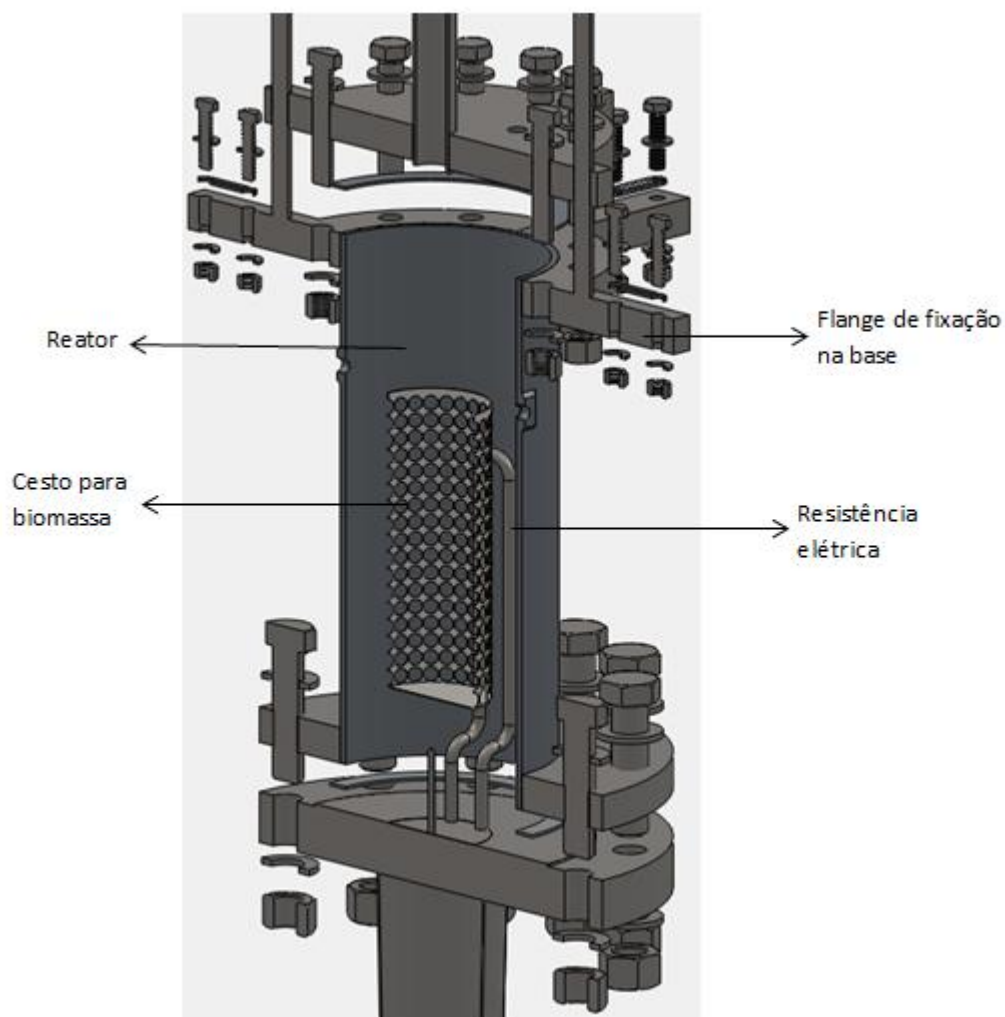


Figura 12. Vista explodida do reator (Colatto, 2011)

Nos flanges superior e inferior do reator, diferentemente das outras 2 seções, foram utilizadas juntas do tipo RF ou *Raised Face*. Esse tipo de junta possui seu diâmetro externo tangenciando os parafusos, fazendo-a autocentrante ao ser instalada.

O reator é fixo na base do equipamento por meio de um flange com quatro abas e por parafusos. Para se ter acesso ao seu interior, as outras, as outras 2 seções, câmara de medição e trocador de calor, são içadas por um conjunto de cabo de aço, polias e manivela, Fig.(13). O processo é bastante simples, bastando retirar os parafusos de fixação. Para o içamento, o flange superior do reator tem dois furos para a passagem de hastes guias, evitando o deslocamento excessivo da parte suspensa.

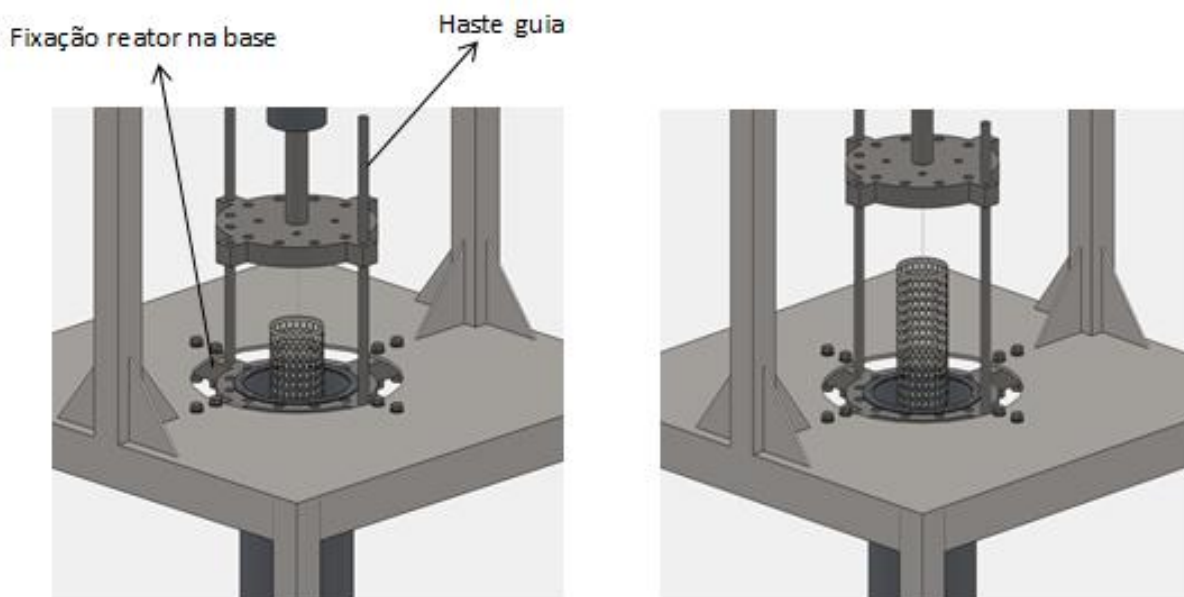


Figura 13. Sistema de abertura do reator (Colatto, 2011)

3.1.4 Resistência elétrica

A resistência elétrica é o elemento que fornecerá energia térmica suficiente para que ocorram as reações de carbonização da biomassa. Como essas reações requerem condições bastante específicas, a resistência deverá atendê-las fielmente. Ou seja, é necessário fornecer a quantidade de calor mínima necessária, a uma taxa específica, bem como manter a temperatura ao longo de todo o processo.

Assim, foi decidido colocar a resistência no interior do reator para amenizar as perdas energéticas para fora do sistema, e tomou-se o cuidado de escolher um material que fosse suficientemente resistente às condições adversas de corrosão no ambiente interno. Foram escolhido três elemento resistivos com potência nominal de 500W cada um, revestido com Incolov 800®, capaz de suprir as taxas de aquecimento necessárias e de ser resistente à corrosão.

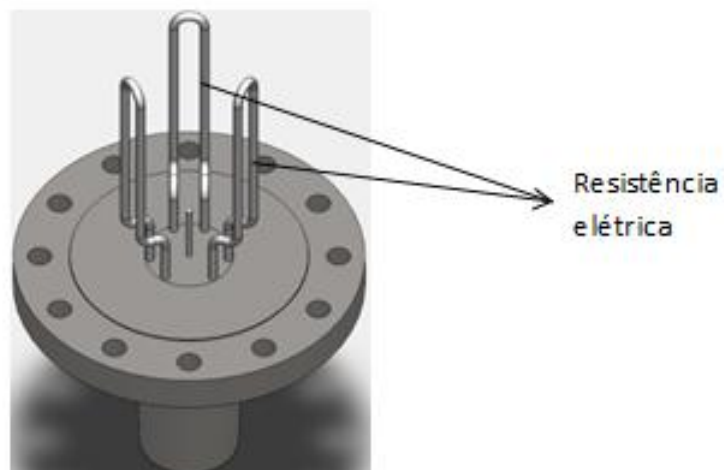


Figura 14. Resistência elétrica (Colatto, 2011)

3.1.5 Cesto de biomassa

O cesto de biomassa será utilizado para colocar uma quantidade pré-determinada de biomassa, podendo ser pedaços de diversos tamanhos de madeira ou até mesmo serragem, contando que tenham baixa massa específica. É importante que esse cesto tenha o menor peso possível, para que não ultrapasse o limite de peso especificado pela célula de carga. Outro fator importante desse componente é que ele tenha uma grande superfície de contato livre, permitindo um fluxo de calor suficiente entre o ambiente e a biomassa contida em seu interior. Isso permitirá que a troca de calor seja grande o bastante e que a volatilização ou o desprendimento de gases do processo seja o mais livre possível.

A comunicação do cesto de biomassa com a célula de carga será feita através de um fino cabo de aço ligando esses dois componentes. Um cabo de aço com pequenas dimensões segue a mesma linha de redução de peso utilizada no cesto. Como a célula de carga possui uma capacidade limitada é importante atentar-se ao peso do sistema: **Cabo de aço + Cesto + Biomassa**. Na Fig.(15) é possível observar o cesto de biomassa com uma superfície lateral bastante “aberta” e o fino cabo de aço para comunicação. Problemas com o alinhamento desse sistema de medição de massa não podem ocorrer, acarretando em diferenças nas taxas de aquecimento caso o cesto venha a tocar em alguma resistência e problemas de aferição de massa, caso o cabo de aço ou o cesto se apoiem em alguma superfície.

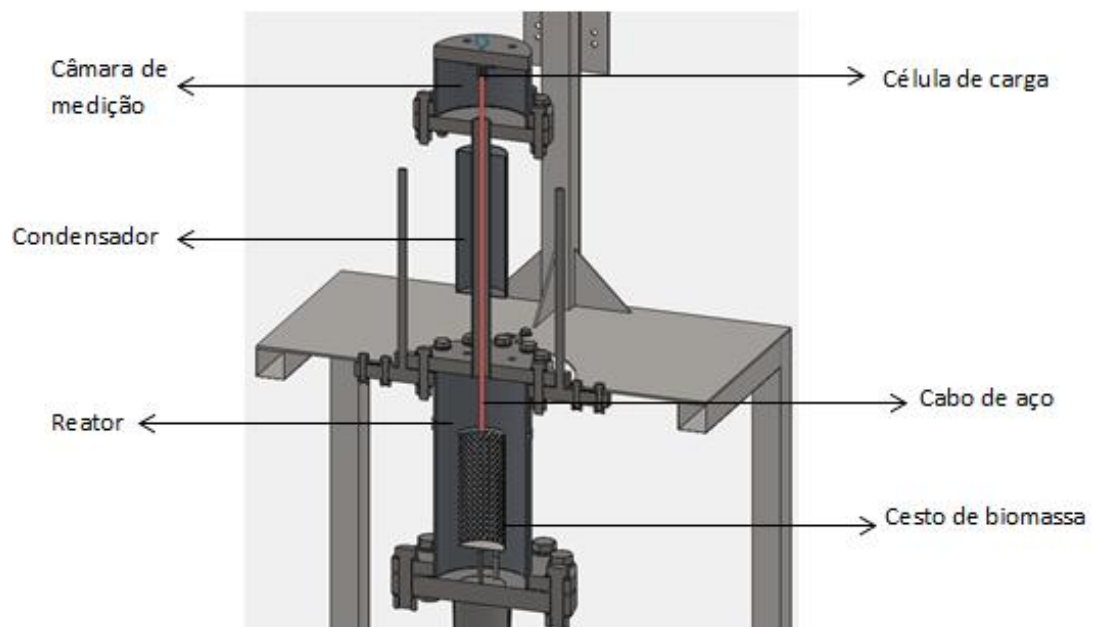


Figura 15. Cesto de biomassa e cabo de aço para comunicação (Colatto, 2011)

3.1.6 Base do equipamento

As três seções descritas anteriormente foram colocadas em uma base projetada para suportar o peso do equipamento, permitir a abertura do reator por meio do içamento da câmara de medição e deixar o equipamento a uma altura adequada para o trabalho e manuseio dos diversos componentes.

A fixação da balança termogravimétrica na base é feita através das quatro abas presentes no reator, utilizando-se parafusos, e o içamento é manual, com auxílio de uma alavanca, de roldanas e de cabo de aço. Como o peso total é elevado, a base possui quatro rodízios que facilitam o seu deslocamento. A Fig.(16) mostra o desenho da base, com uma ponte para o levantamento e abertura do reator.

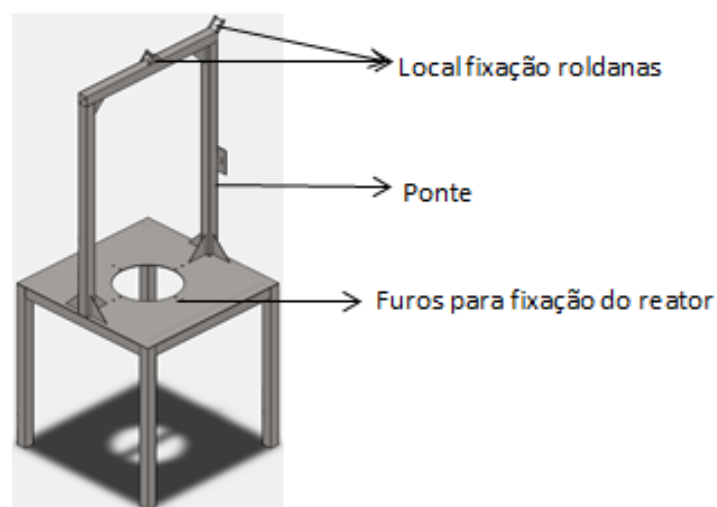


Figura 16. Estrutura da base da balança (Colatto, 2011)

Como a base não é requisitada severamente por aumento de temperatura excessivo e variações de pressão, ela é composta por materiais comerciais mais simples, como aço comum e tubos quadrados, não acarretando em qualquer perigo estrutural e barateando os custos finais do projeto.

3.2 METODOLOGIA DE ENSAIO

A validação e desempenho do equipamento serão feitos pela realização de diversos testes e ensaios, que permitirão avaliar as características do equipamento. Serão testados desde a capacidade de aquecimento do forno e isolamento térmico até o pleno funcionamento dos controles eletrônicos e os de aquisição de dados. Para tanto foram estabelecidos uma série de testes que caracterizarão o desempenho da balança termogravimétrica pressurizada.

Os testes foram decididos levando-se em conta avaliar a máquina tanto em um regime brando como em um regime de grande demanda de esforço e potência por parte dos equipamentos constituintes da balança. A tabela a seguir mostra as características de todos os testes realizados no equipamento.

Para que o entendimento fique mais claro, os testes foram divididos em dois tipos diferentes de ciclo de operação. O primeiro ciclo, as condições extremas de funcionamento são exigidas de todos os componente do equipamento. Já o segundo ciclo, segue uma programação mais realista com os futuros ensaios, respeitando-se tempo de operação, taxa de aquecimento, entre outros fatores. Assim, tem-se:

Tabela 3. Parâmetros para realização dos testes do ciclo 1

Teste	Variáveis				
	Ciclo	Pressão	Meio	Condensador	Amostra
1	1	Atmosférica	Ar	Não	Vazio
2	1	Atmosférica	Ar	Não	Água
3	1	Atmosférica	Ar	Sim	Vazio
4	1	Atmosférica	Ar	Sim	Água
5	1	Atmosférica	Nitrogênio	Não	Biomassa
6	1	Atmosférica	Nitrogênio	Sim	Biomassa
7	1	5 bar	Ar	Não	Vazio
8	1	5 bar	Ar	Não	Água
9	1	5 bar	Ar	Sim	Vazio
10	1	5 bar	Ar	Sim	Água
11	1	5 bar	Nitrogênio	Não	Biomassa
12	1	5 bar	Nitrogênio	Sim	Biomassa

Tabela 4. Parâmetros para realização dos testes do ciclo 2

Teste	Variáveis				
	Ciclo	Pressão	Meio	Condensador	Amostra
13	2	5 bar	Ar	Não	Vazio
14	2	Atmosférica	Ar	Não	Água
15	2	Atmosférica	Ar	Sim	Vazio
16	2	Atmosférica	Ar	Sim	Água
17	2	Atmosférica	Nitrogênio	Não	Biomassa
18	2	Atmosférica	Nitrogênio	Sim	Biomassa
19	2	5 bar	Ar	Não	Vazio
20	2	5 bar	Ar	Não	Água
21	2	5 bar	Ar	Sim	Vazio
22	2	5 bar	Ar	Sim	Água
23	2	5 bar	Nitrogênio	Não	Biomassa
24	2	5 bar	Nitrogênio	Sim	Biomassa

Na tabela a seguir, são mostradas as características de trabalho para cada variável na realização dos testes. Por exemplo, ao se fazer o teste número 18, tem-se que o ciclo de operação da resistência será o de número 2, com a utilização de nitrogênio, com o condensador ligado e com 250 gramas de biomassa em seu interior.

Tabela 5. Caracterização das variáveis para cada tipo de ensaio

VARIÁVEIS		DESCRIÇÃO
Ciclo	1	Resistência ligada a 100% de potência até o reator atingir 500 °C e posterior resfriamento até 90 °C
	2	Rampa de 25 °C até 450 °C com taxa de 5 °C/min, patamar de 3 horas e resfriamento até 90 °C
Pressão	Atmosférica	Reator à pressão ambiente
	5 Bar	Reator pressurizado à 5 Bar
Meio	Ar	Reator operando com ar
	Nitrogênio	Reator operando com nitrogênio
Condensador	Sim	Condensador ligado
	Não	Condensador desligado
Amostra	Água	Reator com 70ml de água em seu interior
	Biomassa	Reator com 250g de biomassa em seu interior
	Vazio	Reator operando vazio

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

Uma descrição geral dos conceitos da balança termogravimétrica pressurizada já foi discutida, sendo agora apresentada uma análise específica da metodologia de ensaio e dos equipamentos utilizados na instrumentação, do controle e da aquisição dos dados. A análise mais detalhada será utilizada para a validação final do funcionamento do equipamento. Para uma melhor compreensão a descrição será dividida em quatro linhas a seguir:

TEMPERATURA – linha que tratará dos conceitos termodinâmicos, como isolamento térmico e resistência elétrica

PRESSÃO – essa linha corresponderá à análise e estudo dos componentes da linha de pressão da máquina, como cilindros de nitrogênio e válvulas reguladoras de pressão.

MASSA – linha específica que tratará da aquisição dos dados relativos à variação de massa nos experimentos realizados.

AUTOMAÇÃO – linha de suporte à balança. Serão tratados todos os equipamentos utilizados na aquisição e tratamento dos dados.

3.3.1 Linha de temperatura

- **Resistência elétrica**

Como descrito no item 3.1.4, a resistência elétrica é a responsável pelo aquecimento do forno, garantindo as temperaturas e taxas de aquecimento necessárias para a realização dos experimentos. Para diminuir as perdas térmicas para o ambiente foram utilizados materiais isolantes.

- **Isolantes térmicos**

As perdas por condução, convecção e radiação são importantes fatores a serem considerados no projeto. Com uma perda elevada por esses três fenômenos, não seria possível obter as condições necessárias de ensaio. A fim de reduzi-la, o forno foi revestido externamente com lã de rocha e também por uma camada refletora de alumínio.

A lã de rocha é responsável pela diminuição nas perdas por convecção natural já que possui uma condutividade térmica de aproximadamente $k = 0,04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Em simulações realizadas computacionalmente foram obtidos valores de potência perdida por condução, convecção e radiação. Observou-se que as perdas mais significativas foram as por convecção e radiação. Logo, decidiu-se revestir externamente o reator com uma placa de alumínio polido (emissividade $\varepsilon = 0.04$), responsável por diminuir esse fenômeno.

3.3.2 Linha de pressão

Um reator de pirólise deve trabalhar com uma atmosfera pobre em oxigênio, pois de outra forma, ao fornecer energia térmica ao sistema, a biomassa iria somente queimar e não seria possível obter os produtos desejáveis. Dessa maneira é importante que a atmosfera seja inerte, quase sem nenhuma presença de oxigênio.

Aliada a essa característica, a balança proposta deverá trabalhar pressurizada em aproximadamente 5 bar de pressão. Por isso decidiu-se trabalhar com gás nitrogênio. O gás nitrogênio, N_2 , presente em 78% da composição do ar atmosférico em volume, é inodoro, incolor, insípido, e sua característica determinante para que fosse utilizada no projeto foi o fato de ser inerte, ou seja, não inflamável e nem comburente. Na indústria, é utilizado na fabricação de aço, de semicondutores e na purga de linhas e tanques.

- **Cilindro de N_2**

O cilindro utilizado é de configuração do tipo T da empresa WhiteMartins. Sua capacidade volumétrica é de 9 m^3 , e a pressão na saída do cilindro de 200 kgf/cm^2 , ou aproximadamente 196,13 bar.



Figura 17. Cilindro de gás nitrogênio

- **Válvula redutora**

Como a pressão de trabalho dentro do reator é de aproximadamente 5 bar, foi necessário reduzir a pressão na saída do cilindro (196 bar) antes da entrada do reator. Isso pôde ser feito com o auxílio de uma válvula redutora. A válvula utilizada foi do tipo diafragma de duplo estágio, onde a pressão na saída será constante independentemente da pressão no interior do cilindro.

Assim regulou-se a pressão de saída em aproximadamente 8 bar, suficiente para atender aos requisitos propostos, além de todo o sistema não fica sujeito a pressões muito elevadas como as do interior do cilindro.



Figura 18. Válvula redutora de pressão

- **Válvula de saída**

A válvula de saída se localiza ao final do reator e é a responsável por dar vazão aos gases da reação de carbonização, do nitrogênio que fora injetado, garantindo um fluxo contínuo e controlado. Uma função secundária dessa válvula é a de despressurização ao final de cada experimento, agilizando o processo.

Essa válvula precisa ser resistente à temperatura, podendo chegar a mais de 150 °C, devido à passagem dos gases quentes. Por esse motivo, decidiu-se utilizar uma válvula de gaveta. Ao ser acionada manualmente, o obturador, que pode ter a forma de disco ou de cunha, atua através de uma haste que fica montada na tampa da válvula, promovendo por meio de uma rosca própria, movimentos de translação do disco ou cunha, em sentidos ascendente e descendente, perpendiculares à trajetória do fluído, abrindo ou fechando, respectivamente, a válvula.

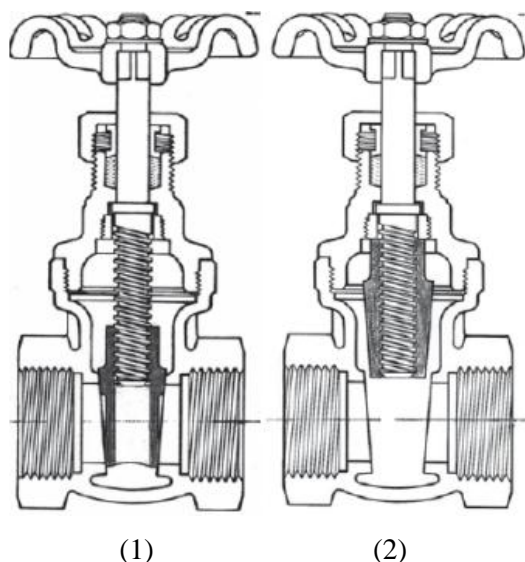


Figura 19. Válvula de saída Fechada (1) e Aberta (2)

- **Válvula solenoide**

A válvula solenoide fará a dosagem de nitrogênio, controlando a pressão no interior do reator. Essa válvula tem funcionamento simples, eficiente e de rápida atuação. Possui uma bobina em seu interior e, quando percorrida por uma corrente elétrica, gera uma força no êmbolo que se encontra no centro, tornando-o um atuador que abre e fecha a passagem de fluxo de fluido. Com retorno por mola da Jefferson 1327 Series, com pressão de trabalho de até 50 bar e resistente às temperaturas de 180°C para vazões intermitentes, a válvula é ideal para o equipamento. Além disso, possui uma boa vedação de teflon resistente a fluidos corrosivos e trabalhar com corrente alternada, 60Hz e tensão de 220V, sendo facilmente adaptável aos controladores que serão detalhados mais adiante.



Figura 20. Válvula solenóide

- **Amortecedor**

Os amortecedores de pressão restringem a passagem do fluido de processo para o instrumento de medição, de modo a diluir ou suprimir os efeitos de pulsação e picos de pressão. Foi com esse intuito que se utilizou um vaso acumulador entre o cilindro principal de nitrogênio e o reator. Ou seja, a cada liberação de nitrogênio causada pela abertura da válvula, essa quantidade de gás ocupa o volume do vaso acumulador e somente após é injetada no reator. Assim a variação de pressão ocorre em sua maioria no vaso acumulador (amortecedor), e a injeção de N_2 no reator se torna mais suave, não prejudicando a aferição feita pela célula de carga, já que a entrada de gás dá-se pela câmara de medição.

O amortecedor utilizado foi uma adaptação de um antigo extintor. Um furo em sua parede lateral foi feito para a entrada de N_2 vindo do cilindro principal, e a saída foi feita por meio da abertura já existente no topo. Encontram-se amortecedores no mercado que são específicos para cada situação, porém, de maneira provisória, o sistema funcionou com bastante eficiência.



Figura 21. Linha de pressão

- **Tubulação**

A tubulação é a responsável por fazer o transporte do nitrogênio até o reator, passando pelas válvulas e, também, pela exaustão dos gases da reação de carbonização. Assim, conta com tubos de aço resistente à pressões de 300bar e temperaturas de até 500 °C. As conexões também são de aço com roscas NPT 1/4". Há também utilização de uma mangueira flexível, revestida

com duas mantas de aço resistente à pressão de até 480 bar usada entre a válvula redutora e a válvula solenoide, devido à necessidade de uma conexão flexível nesse trecho.

- **Representação da linha de pressão**

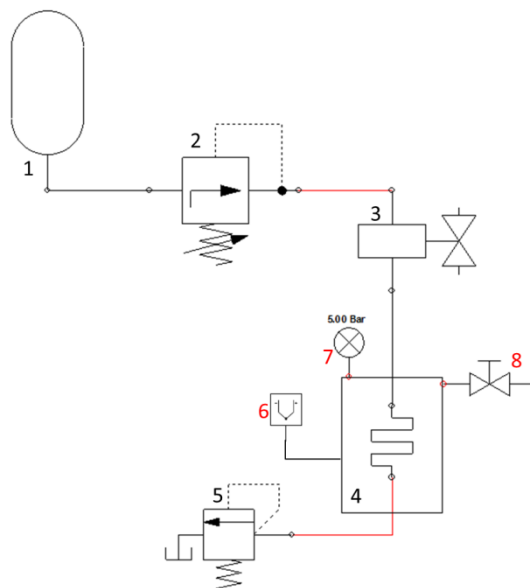


Figura 22. Linha de pressão. (1) Cilindro de N₂; (2) Válvula redutora; (3) Válvula solenoide; (4) Reator; (5) Válvula de saída; (6) Termopar; (7) Indicador de pressão; (8) Válvula de segurança.

3.3.3 Linha de massa

- **Célula de carga**

O diferencial desse projeto é a localização da célula de carga para medição da variação de massa ao longo do processo de carbonização. Em experimentos anteriores, chegou-se a utilizar células de carga mais resistentes e colocadas na parte de baixo do reator, porém eram severamente danificadas devido ao calor e aos subprodutos liberados pelas reações. A saída foi colocar o equipamento em cima de uma balança, como em um supermercado. Dessa maneira, o sistema de medição não mais seria danificado, porém a leitura da massa não representava fielmente o que estava acontecendo.

Analisando-se com maior cuidado, o uso de uma balança exterior ao equipamento medirá uma variação de massa somente do componente que sair do sistema **Reator + Balança**. Ou seja, uma vez liberado gases a partir da biomassa e esse mesmo gás condensasse dentro do reator, a massa final do sistema seria a mesma, porém a biomassa teria uma redução percentual em sua medição.

A solução encontrada foi colocar a célula de carga no interior do reator, em uma câmara separada e no topo do equipamento, o que jamais tinha sido feito. Com isso, evita-se o erro de leitura devido a qualquer condensação que ocorra em seu interior e, também, possíveis danos que a temperatura e os subprodutos da reação possam causar.

A célula de carga utilizada foi uma PW4C3/3KG da HBM do tipo “ponto único” ou Single point. A carga máxima admissível é de 3kg, e seu funcionamento é relativamente simples. Através das deformações estruturais, é capaz de mensurar grandezas como pressão, força, torque, aceleração, etc. Sendo assim, podem ser classificadas como transdutores, transformando força em tensão elétrica. Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência de um material metálico condutor, o extensômetro, que é colado sobre a estrutura. Ao sofrer uma tensão mecânica, a estrutura em análise tende a se deformar dentro do regime elástico. Essa deformação é transformada em variação de resistência e que por fim é convertida em variação de tensão. Esses valores são lidos através de equipamentos específicos e pode ser feito uma curva de calibração para melhores resultados.

Outro fator de grande importância é o alinhamento da carga com o ponto de aplicação da mesma. Esse tipo de célula de carga tem um ponto específico para aplicação da força, pois o mesmo não é centralizado no corpo do instrumento. Ele é deslocado para uma das pontas, e um erro de descentralização poderia ocasionar medições equivocadas, devido a momentos resultantes distintos. O sistema **Cabo de aço + Cesto de biomassa** deve estar a todo o momento livre de qualquer interferência física e possuir todos os graus de liberdade. Para maior clareza, segue Fig. (23).

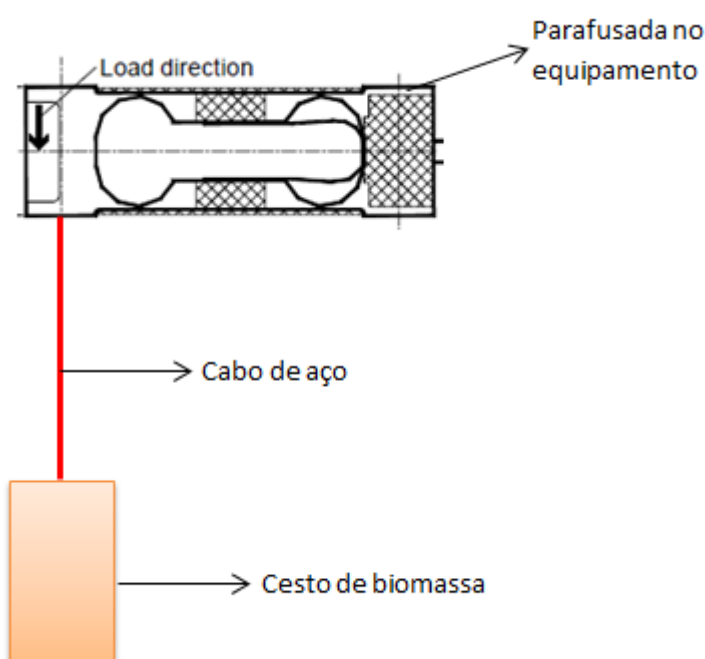


Figura 23. Célula de carga e seu alinhamento com o cesto de biomassa

O alinhamento foi estipulado no projeto de construção do equipamento, devendo então ser respeitados todas as características técnicas. Uma mudança nas dimensões da célula de carga pode acarretar um não alinhamento entre a massa e o ponto de aplicação. As dimensões do reator são bastante restritivas e, por isso, deverão ser utilizados os equipamentos aqui explicitados.

Um componente auxiliar da célula de carga utilizado foi um prensa-cabos. Como a célula de carga está no interior do equipamento e precisa ser feita a ligação com controladores, a saída do fio de comunicação é feita por meio de um furo, utilizando-se o prensa-cabos para evitar qualquer tipo de vazamento e mantendo a pressão constante.



Figura 24. Prensa - Cabos

3.3.4 Linha de automação e controle

O controle manual implica ter um operador no processo produtivo de determinado bem e, de acordo com seu conhecimento técnico, opera um equipamento que possui diversas alavancas, chaves e válvulas que modificam as variáveis do processo. Muitas vezes essa operação pode ser lenta e exaustiva e, por isso, novas metodologias operacionais estão sendo estudadas.

Com o constante aumento da demanda por processos produtivos mais eficientes, mais rápidos e com qualidade superior, a automação industrial vem se consolidando como solução para as indústrias dos mais diversos ramos. A aplicação de técnicas, aliada à evolução da

engenharia mecânica, consolida uma nova era onde os mecanismos tem capacidade de verificar o seu próprio funcionamento, alertar para eventuais falhas e até mesmo capacidade de introduzir autocorreções para garantir sua funcionalidade.

Se por um lado a automação demanda um número menor de mão-de-obra qualificada e especializada, por outro lado aumenta a velocidade de produção, diminui desperdícios e custos e acaba proporcionando melhores condições de trabalho e segurança para os trabalhadores. Assim a evolução do estudo sobre automação é constante, e novas tecnologias são apresentadas sistematicamente. Cabe a cada empreendimento adaptar sua produção à tecnologia que mais lhe trará ganhos a um melhor custo x benefício.

Nesse contexto, será implementada toda uma rede de automação e medição para a realização dos experimentos com a balança termogravimétrica pressurizada. Além dos equipamentos descritos a seguir, uma importante ferramenta será o uso do software LabView.

LabView ou *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, é uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments* feita de acordo com o modelo de fluxo de dados . A partir de uma interface simples e através dos diagramas de bloco (instrumentos virtuais), que contém o código gráfico do programa, o programador pode realizar inúmeras rotinas independentes umas das outras. A praticidade também vem do fato de que o programador não precisa escrever nenhuma linha de código, simplesmente configura os “blocos”.

- **Controlador lógico programável – CLP**

Os controladores lógicos programáveis são equipamentos eletrônicos utilizados em sistemas de automação flexível. São ferramentas de trabalho muito úteis e versáteis para aplicações em sistemas de acionamento e controle industrial, e por isso são largamente utilizados em laboratórios de pesquisa e em fábricas. Por sua versatilidade, proporcionam a alteração dos diferentes controles de saída em função das entradas (input e output). Assim, diferentes sinais de entrada podem ser utilizados para controlar diversos atuadores ligados nos pontos de saída.

A Fig.(25) mostra que a estrutura de funcionamento de um CLP pode ser dividida em três partes fundamentais: Entrada, Processamento e Saída.



Figura 25. Estrutura de funcionamento de um CLP

A unidade de processamento é onde serão relacionados os dados de entrada com os dados de saídas, por meio de uma programação lógica (equações) que descreve o seu comportamento. Ou seja, variações nos dados de entrada resultam em alterações na saída baseadas na programação que rege o processo.

Então, pode-se entender que o trabalho de um sistema de automação que interpreta os sinais das variáveis de entrada é de aplicar ações nas variáveis de saída, que as façam convergir para uma faixa aceitável de valores determinados dentro do processo. Por exemplo, manter a pressão em um ambiente constante pela abertura e fechamento de uma válvula.

Existem alguns sistemas de controle de processos que diferem em como a variável de saída é tratada, sendo eles classificados em **Malha Aberta** e **Malha Fechada**.

a) O sistema de controle baseado em malha aberta é geralmente aplicado em processos mais simples. Nele, não há realimentação da variável de saída para se ajustar o processo. Ou seja, há somente um sinal pré-determinado na entrada para se obter um sinal pré-determinado na saída, que pode ser previsto por modelos matemáticos ou calibrações. Dessa forma não se acompanha a evolução do processo para se determinar como o sinal de entrada deve se comportar para que se atinja a saída desejada.

b) O sistema de controle baseado em malha fechada é geralmente aplicado em processos mais complexos, onde existe a necessidade de se ter um controle mais estrito. Diferentemente do que ocorre com processos de malha aberta, no sistema de malha fechada existe uma realimentação do comportamento dos dados de saída no ciclo. Assim, o controlador terá um *feedback* do que ocorre na saída e aplicará ações nos sinais das variáveis de entrada, a fim de corrigir e compensar o andamento do processo. Assim, eventuais distúrbios externos serão amenizados. Esquemáticamente tem-se:

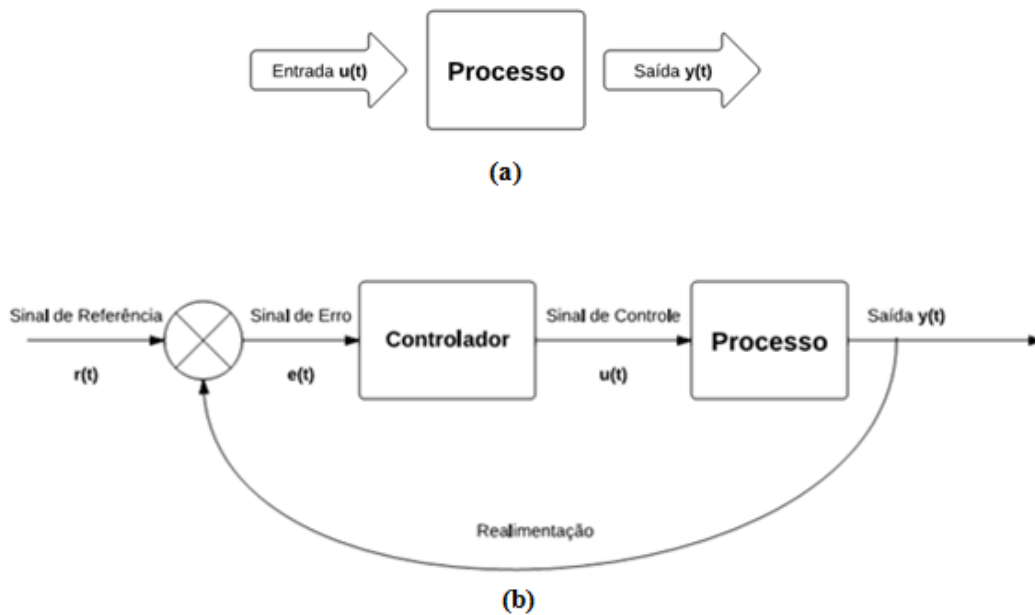


Figura 26. Representação esquemática de (a) malha aberta e (b) malha fechada

De forma geral, a fim de se aumentar a precisão ou confiabilidade do sistema de controle, compara-se o sinal de saída $y(t)$ com o sinal de referência $r(t)$, também chamado de *set-point*, de forma a se determinar um erro ou desvio, representado na figura por $e(t)$.

A função do controlador é determinar, a partir do conhecimento de $e(t)$ e das equações que regem o sistema, qual sinal $u(t)$, chamado de sinal de controle, deve ser aplicado ao processo controlado, de forma que o sinal de saída, $y(t)$ fique dentro de valores desejáveis ou obedeça a um comportamento específico.

A partir desses dois sistemas de malhas, existem outros tipo de controladores que se diferem no tipo de implementação que caracteriza o comportamento do controlador tanto em regime transiente quanto em regime permanente de um processo. Os mais significativos, de malha fechada, são os controladores:

- Controladores de duas posições ou *on/off*
- Controladores Proporcionais
- Controladores Integrais
- Controladores Integrais e Proporcionais (PI)
- Controladores Proporcionais e Derivativos (PD)
- Controladores Proporcionais, Integrais e Derivativos (PID)

No âmbito desse trabalho foram utilizados controladores PID, modelo NOVUS N1200 Auto-adaptativo, Fig.(26), cabendo, então, um estudo mais detalhado somente desse tipo de controlador.



Figura 27. Controlador PID NOVUS N1200

A estrutura de um controlador PID pode ser representada através do diagrama de blocos a seguir:

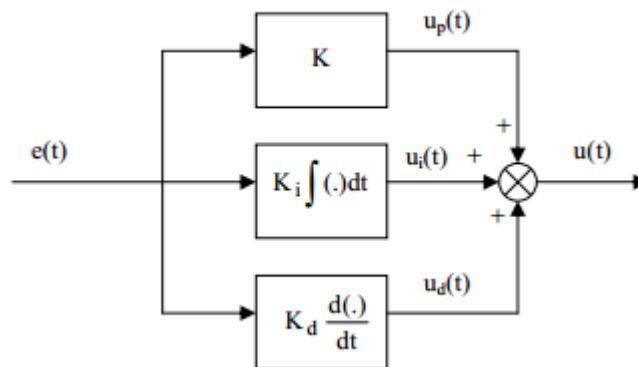


Figura 28. Controlador PID

Com base no sinal de diferença existente entre o sinal de referência $r(t)$ e o sinal de saída $y(t)$, o controlador gera em sua saída um sinal de controle $u(t)$ que seja capaz de corrigir e anular tal diferença (Ver Figura 26). Para o controlador PID, a lei de controle descrita pelo bloco do controlador é composta por três termos,

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (3.1)$$

Cada um dos termos do lado direito da equação 3.1 são associados a cada um dos tipos de ações do controlador e, em níveis de blocos, pode ser representado conforme Fig.(36).

O bloco superior é o responsável pela ação proporcional do controlador, e o sinal de saída desse bloco pode ser expresso da seguinte maneira:

$$u_p(t) = K e(t) \quad (3.2)$$

E de maneira análoga, pode-se representar a ação integral e derivativa do controlador.

$$u_i(t) = K_i \int e(t) dt \quad (3.3)$$

$$u_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

No **Controle Proporcional**, o valor da variável manipulada (MV) é proporcional ao valor do desvio Setpoint – Variável do Processo (SV - PV), ou seja, para um desvio zero (SV = PV), MV=0. À medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. O valor de desvio que provoca MV=100% define a banda proporcional (PB). Com PB alta, a saída MV só irá assumir um valor alto para corrigir o processo se o desvio for alto. Com PB baixa, a saída MV assume valores altos de correção para o processo mesmo para pequenos desvios. Ou seja, quanto menor o valor de PB, mais forte é a ação proporcional de controle.

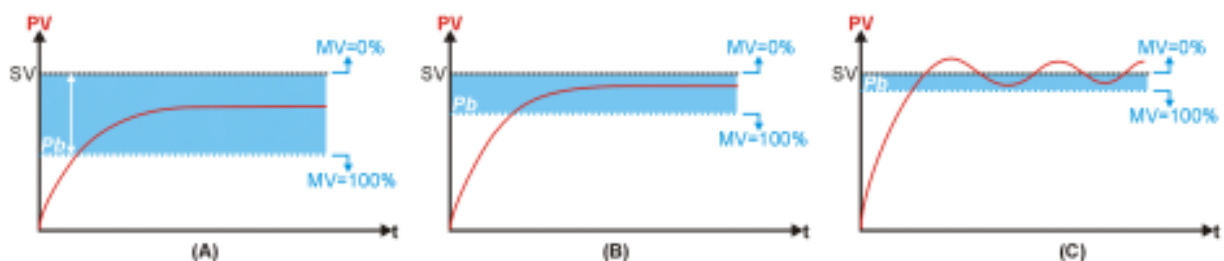


Figura 29. Efeito do controle proporcional

Na Fig.(29a), com uma banda proporcional elevada, o processo se estabiliza, porém abaixo do setpoint. À medida que a banda proporcional diminui, Fig.(29b), a estabilização ocorre mais próximo do setpoint. Porém, uma redução excessiva da banda proporcional Fig.(29c) gera instabilidade.

O **Controle Integral** não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. Ele consiste em uma resposta na saída do controlador MV que é proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional.

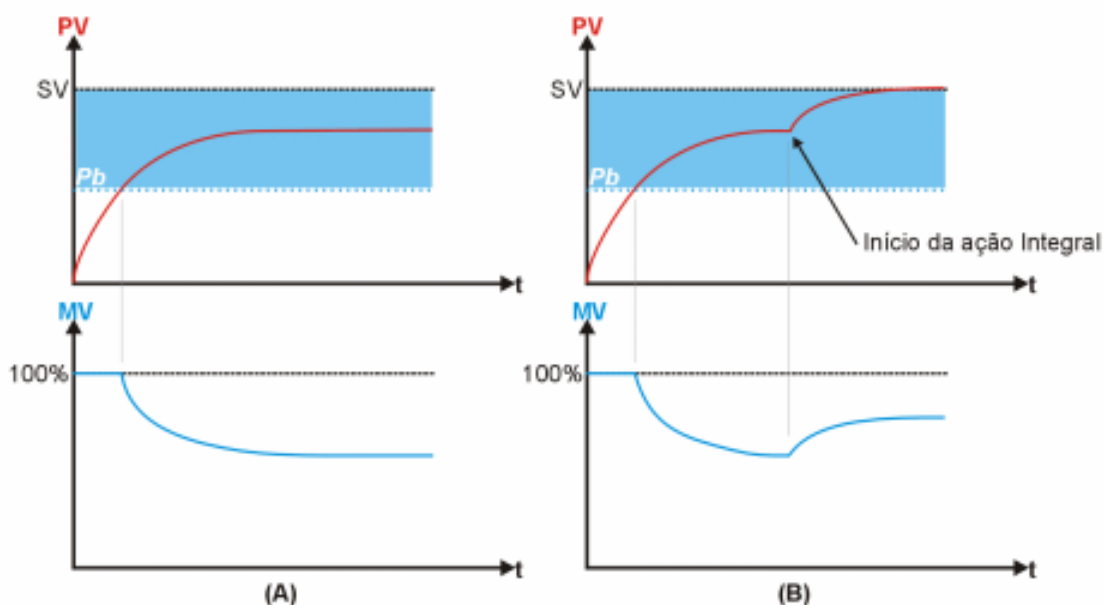


Figura 30. Efeito do controle (a) sem PI e (b) com PI

Na Fig.(30a) tem-se um processo estabilizado onde PV e MV atingem uma condição de equilíbrio em que a quantidade de energia entregue ao sistema MV é a necessária para manter PV no valor em que ela está, porém o valor do setpoint não fora atingido. Na Fig.(30b) a ação integral foi incluída e pode-se observar a gradual elevação do valor de MV até se atingir um valor onde $PV=SV$.

O **Controle Derivativo** também não pode ser empregado separadamente de uma ação proporcional. Consiste em uma resposta na saída do controlador MV, que é proporcional à velocidade de variação do desvio. Tem, portanto, o efeito de reduzir a velocidade das variações de PV, evitando que se eleve ou reduza rapidamente. É um controle que só atua quando há variação no erro, ou seja, efeito nulo se o processo está estável. Assim, sua principal função é melhorar o desempenho do processo durante os regimes transitórios.

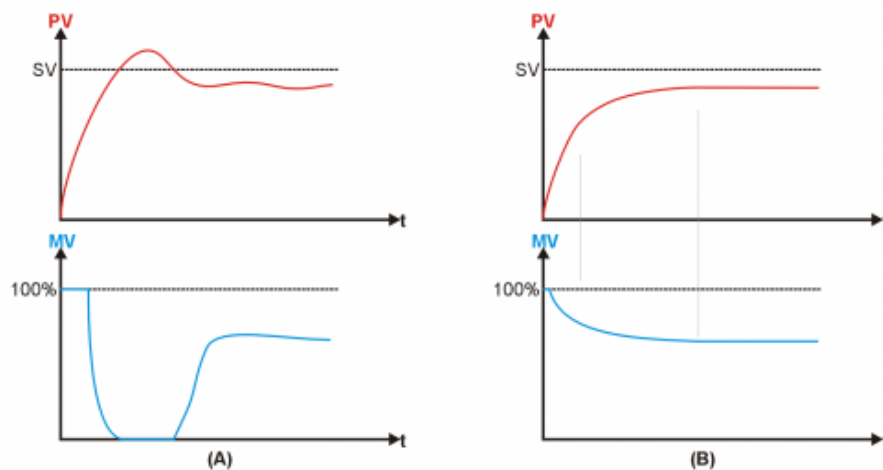


Figura 31. Efeito do controle (a) sem PD e (b) com PD

Dessa maneira, o controle derivativo diminui possíveis efeitos oscilatórios, reduzindo o valor de MV se PV está crescendo muito rápido. Ao antecipar a variação de PV, a ação derivativa reduz ou elimina o *overshoot* (PV ultrapassa SV) e as oscilações no período transitório do processo.

- **Transmissor de pressão**

O transmissor de pressão (do tipo piezo-resistivo) mede a pressão do processo ao qual está ligado por meio de um elemento chamado diafragma. Esse se encontra em contato direto com o meio medido e, à medida que a pressão varia, o diafragma é pressionado proporcionalmente. Um pequeno sensor localizado na parte interna do diafragma converte a variação de pressão em uma variação proporcional de resistência elétrica. Um pequeno circuito eletrônico converte este tipo de informação em um sinal proporcional de 4-20 mA, que pode ser ligado a praticamente qualquer tipo de dispositivo de automação como o CLP descrito anteriormente. O modelo utilizado foi o TP-150, fabricado pela Huba Control. Suas características técnicas são fornecidas nos anexos desse trabalho.

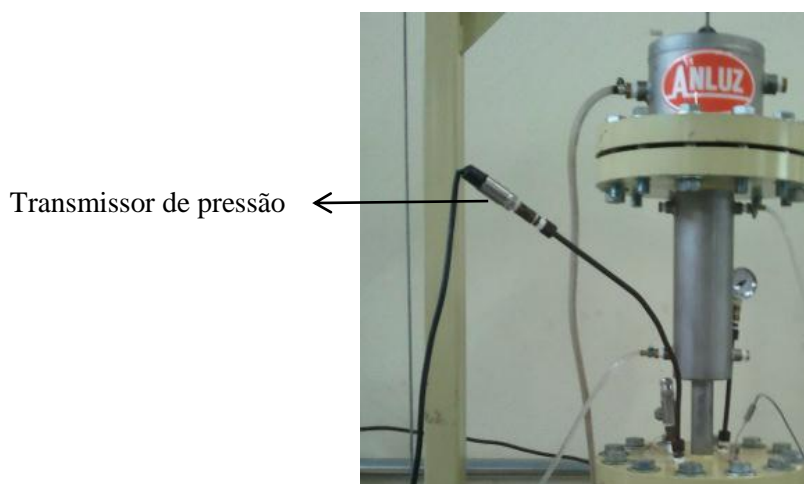


Figura 32. Transmissor de pressão

- **Termopar tipo k**

Os termopares utilizados foram os do tipo K, de Cromo e Alumínio, por apresentarem excelente resistência à ambientes corrosivos. A faixa de temperatura medida varia entre 0°C e 1250 °C, o que é suficiente para o trabalho proposto. Foram utilizados três termopares em posições distintas, que serão discutidas no próximo capítulo, pois a posição influencia diretamente a continuidade do processo de carbonização. Os termopares utilizam conexões de dupla anilha desenvolvidas pela Swagelock, havendo limites de erro de 0,75% na leitura.



Figura 33. Termopar tipo k

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tópicos seguintes trarão os resultados, desafios e soluções encontrados ao longo do projeto. Toda as análises feitas buscaram a melhor aproximação das condições reais em que o equipamento deverá trabalhar quando validado. Resumidamente, as condições exigidas para sua validação são:

- Faixa de pressão de operação: 0 a 10 bar
- Temperatura de operação máxima: 450 °C
- Massa da amostra: mínimo de 0,250 kg de madeira ou outro material com baixa massa específica.
- Taxa de aquecimento da amostra: 5 °C /min
- Aquisição e monitoramento dos parâmetros em tempo real
- A balança deve permitir a análise posterior dos produtos com o mínimo de perdas/contaminações possíveis.

A mesma ideia do capítulo anterior será utilizada, separando o equipamento em linhas de atuação e verificando-as individualmente.

A aquisição e registro dos diversos dados necessários para o funcionamento do equipamento foram realizados através de um módulo *FieldLogger I/O*. Funciona por meio de um sistema de aquisição e registro de variáveis analógicas composto de uma unidade microprocessada inteligente, e que pode ser usada como um *data logger* registrador de forma autônoma ou como um terminal remoto de aquisição de dados em tempo real. Possui 8 canais analógicos que são suficientes para a utilização dos diversos sensores e controladores na realização dos ensaios.

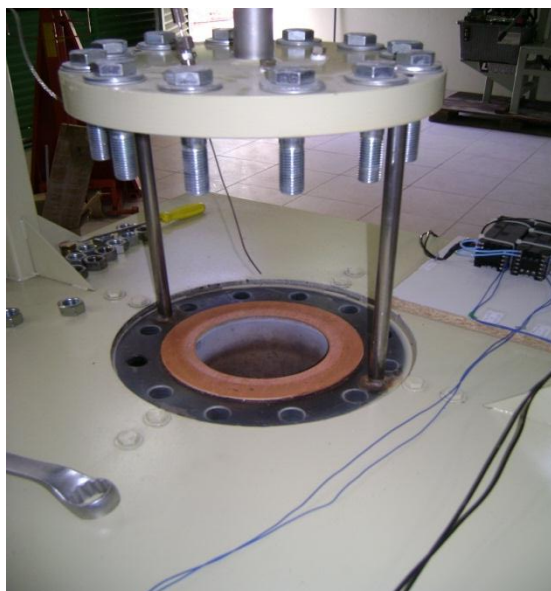
4.1 LINHA DE TEMPERATURA

4.1.1 Isolamento térmico

Os primeiros testes para validação do reator foram realizados para verificação das condições de taxa de aquecimento e temperatura máxima atingida. Para tanto, um ensaio foi preparado para análise dessas variáveis.

Para a obtenção dos dados de temperatura e taxa de aquecimento foram utilizados dois termopares do tipo k. O primeiro foi posicionado no meio do reator que é o objeto de estudo nesse ensaio. E um segundo termopar foi posicionado na resistência, a fim de mostrar o quão ela é exigida em relação ao aquecimento do equipamento.

Para o controle do funcionamento da resistência, foi utilizado um controlador NOVUS N1200 com parâmetros PID. Assim, ele controlará a taxa de aquecimento e temperatura máxima a partir de uma pré-programação feita pelo operador. Em paralelo, a validação do uso desse tipo de controlador também será avaliada, verificando se seus parâmetros são suficientes para um controle eficaz.



(a)



(b)

Figura 34. Posicionamento do termopar do (a) reator e (b) da resistência

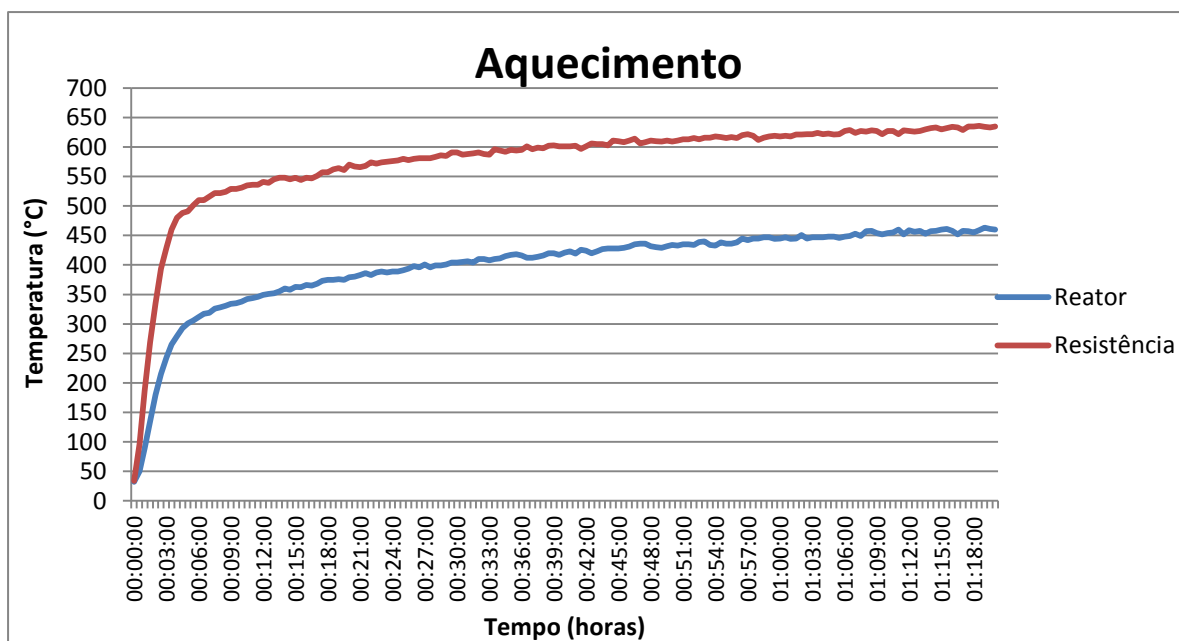


Figura 35. Teste de aquecimento e comportamento térmico

A realização do teste foi feito com a resistência ligada em sua potência máxima e com o reator vazio. Pôde-se observar que a taxa de aquecimento média ficou em 5,4 °C/min, e o reator atingiu uma temperatura máxima de 504 °C. Em aproximadamente 350 °C observa-se a brusca diminuição da taxa de aquecimento, ocasionada pela grande diferença de temperatura do reator e do equipamento como um todo. Outro fator de grande influência é o isolamento térmico e as convecções geradas no interior do equipamento.

Outro teste complementar foi realizado, a fim de testar um aquecimento controlado, com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, capaz de verificar o comportamento do controlador.

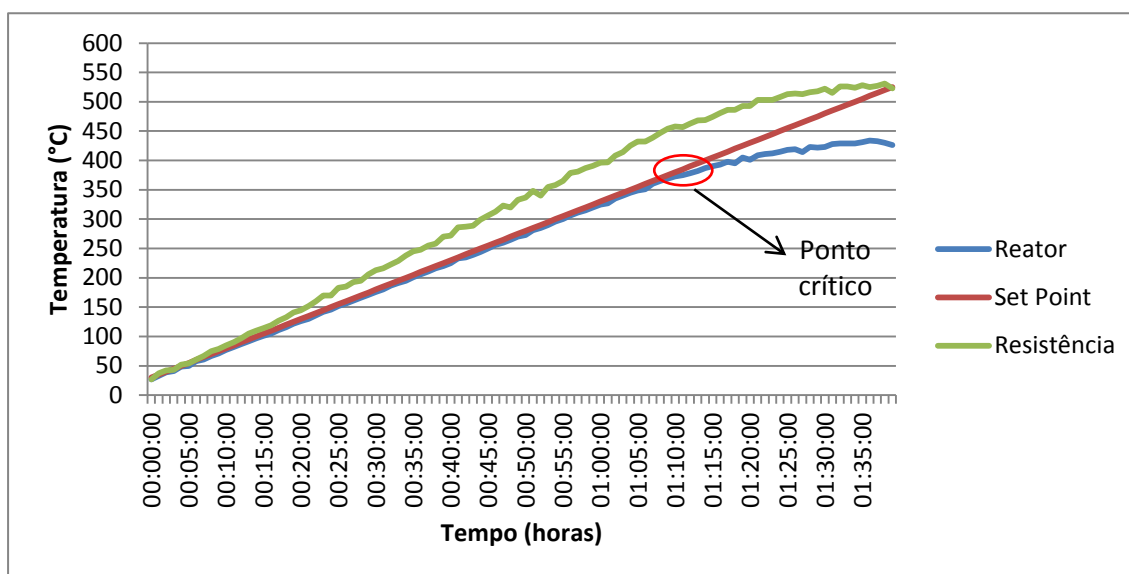


Figura 36. Teste de aquecimento 5 °C/min

Confirmando o que foi encontrado no gráfico anterior, Fig.(35), o reator não estava conseguindo manter uma taxa de aquecimento constante (abaixo de 5°C/min). Ao se aproximar de 350°C (ponto crítico) ocorria uma diferença entre a temperatura do reator e do *Set Point* (SV) de aproximadamente 31°C. Além disso, a temperatura máxima atingida foi menor do que a temperatura estabelecida dentro do tempo previsto.

A partir desses resultados, decidiu-se melhorar o isolamento térmico da parte interna do reator com lã de vidro e alumínio, já que o isolamento da parte externa já estava estabelecido. A lã de vidro ameniza as perdas térmicas por condução, já que sua condutividade térmica é bastante reduzida, em torno de 0,038 W/m² °C. Outras características que justificam a sua utilização é que ela é incombustível, não deteriora e nem apodrece, e suas propriedades se mantêm ao longo do tempo.

A chapa de alumínio foi colocada de maneira a cobrir toda a superfície lateral do forno. Assim, são amenizadas as perdas por radiação. Outro detalhe importante é o posicionamento dos isolantes. Primeiramente, reveste-se a parede do forno com uma camada de lã de vidro e, após, é colocada uma chapa de alumínio conforme ilustra a Fig.(37).

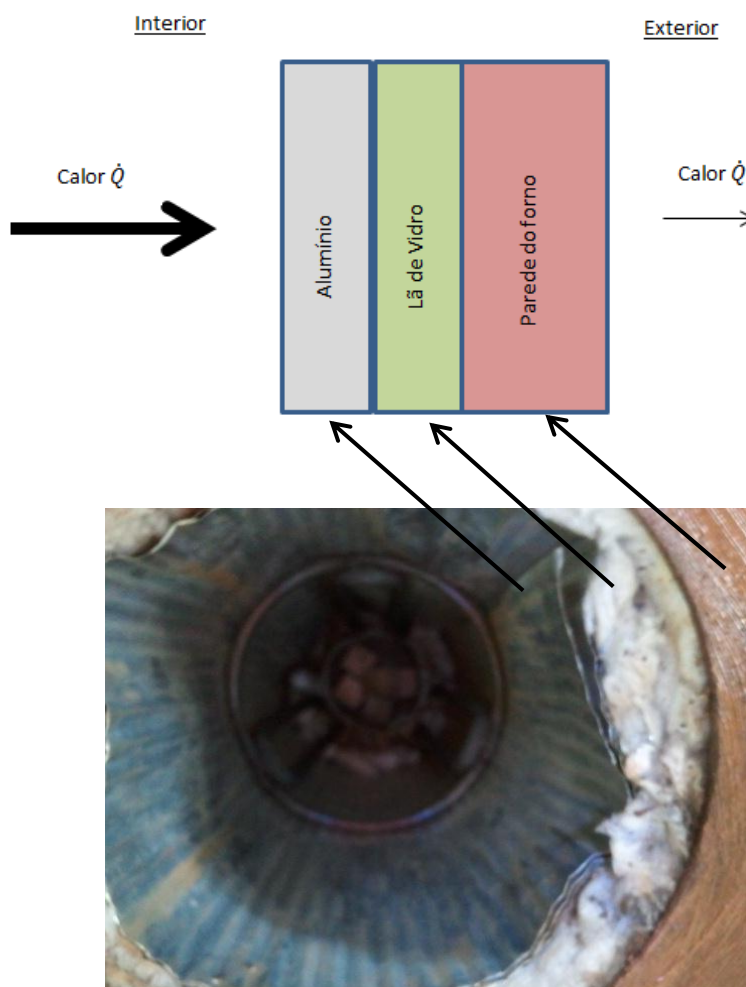


Figura 37. Isolamento térmico

Feitas as modificações, um teste idêntico foi realizado, e as seguintes curvas foram obtidas.

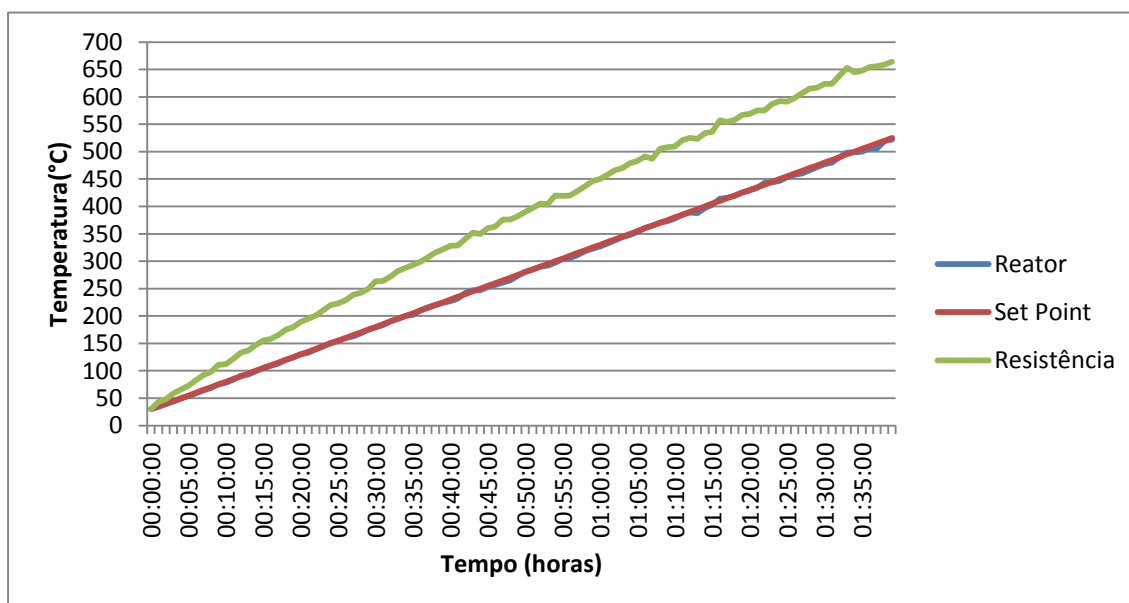


Figura 38. Teste de aquecimento 5°C/min com reator isolado

Observam-se as curvas da temperatura do reator e *Set Point* coincidentes (diferença máxima de 1°C) e uma temperatura máxima de 530°C demonstrando que as modificações no isolamento térmico foram suficientes para garantir os requisitos de projeto. Outro resultado importante foi que o controlador atuou perfeitamente, controlando a taxa de aquecimento e a temperatura máxima estipulada.

Depois que foi possível verificar o bom funcionamento do reator em relação ao seu aquecimento e também o bom funcionamento do controlador PID ligado à resistência elétrica, os testes estabelecidos anteriormente, item 3.2, foram realizados.

Primeiramente, foram realizados os testes mais simples, não pressurizados e sem amostra em seu interior. Logo após, realizou-se teste com somente água e ambiente pressurizado com a ajuda de um compressor. Lembrando que nos testes feitos com o compressor, não poderia ser colocada biomassa, por causa do perigo de o equipamento pegar fogo, já que a atmosfera em seu interior não está inerte.

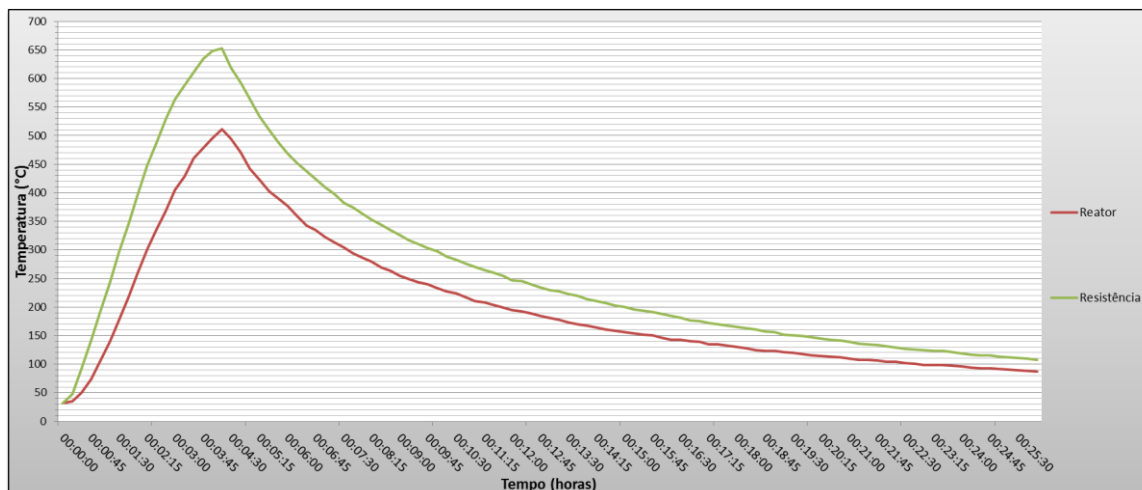


Figura 39. Teste N°1 (referência Tabela 3)

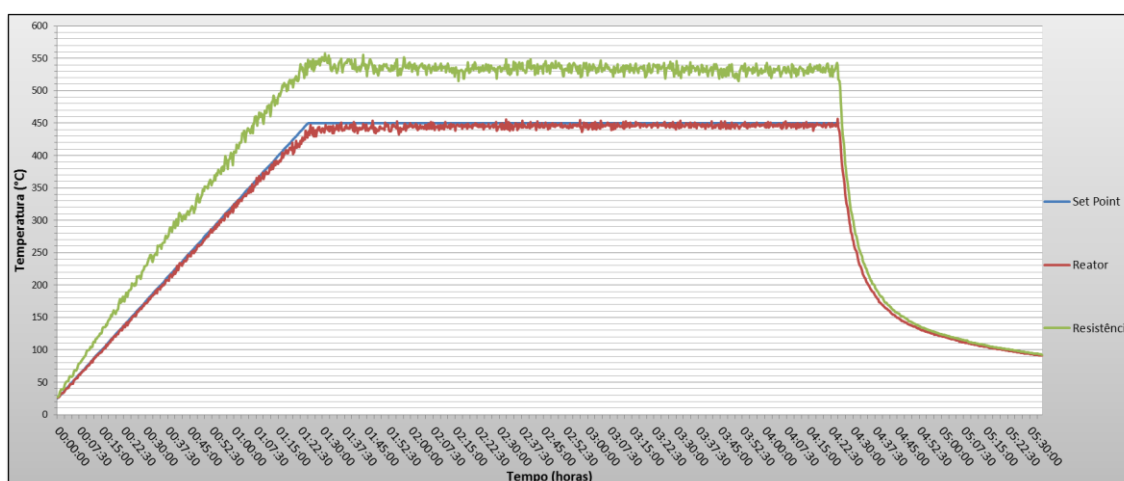


Figura 40. Teste N° 22 (referência Tabela 4)

As Figuras 39 e 40 representam, respectivamente, o ensaio mais simples e o ensaio mais completo (pressurizado, com amostra e condensador ligado), utilizando-se água. Nos dois testes, os parâmetros de funcionamento foram atingidos, o controlador funcionou perfeitamente e não houve problemas com a pressurização, sendo mantida a aproximadamente 5 bar.

Realizados todos os testes, sem utilização da biomassa, foi possível verificar os diversos sistemas do reator. O seu comportamento com uma grande quantidade de água não foi afetado significativamente. Houve, sim, uma maior dificuldade para se manter a taxa de aquecimento, exigindo maior potência da resistência elétrica, porém um valor de 4,8 °C/min foi atingido nas situações mais críticas. Esse valor é suficiente para a realização dos ensaios.

4.1.2 Posicionamento dos termopares

Os termopares são fundamentais para o bom funcionamento do equipamento. Se, por acaso, for feita uma leitura que não corresponda à realidade, os experimentos não poderão ser conclusivos por causa dos erros associados. Por isso, acrescentaram-se mais dois termopares no reator. Agora, com quatro termopares distribuídos em diferentes pontos, foi possível verificar se as leituras adquiridas correspondem ao que realmente acontece. O esquema a seguir mostra o posicionamento do termopar após serem acrescentados os outros dois, Fig.(41):

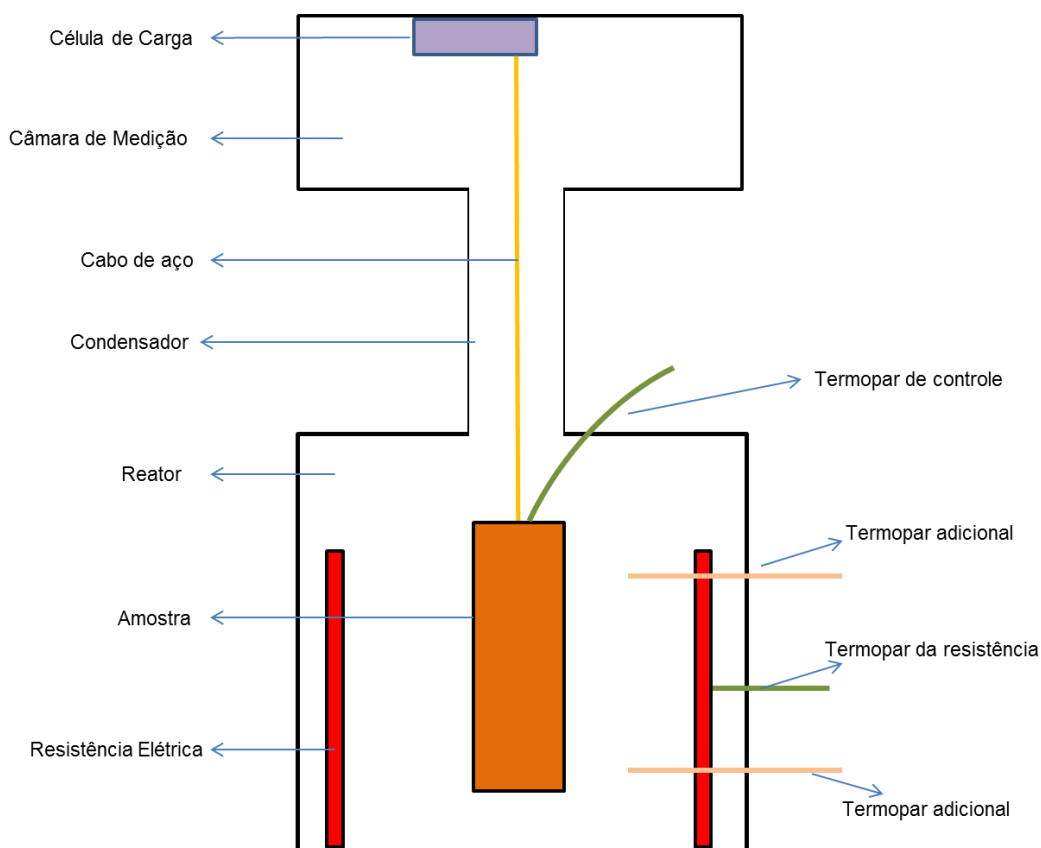


Figura 41. Posicionamento dos termopares original

Após essas modificações, foi realizado um novo ensaio onde foi observada uma discrepância entre as temperaturas medidas pelos termopares, Fig.(43). O termopar de controle acusou uma temperatura inferior se comparado com os outros dois adicionados. Esse fenômeno pode ser explicado pela ocorrência de convecção forçada dentro do reator e também pelo fato de que, nessa posição, o termopar fica próximo à tampa do reator que não é isolada termicamente.

Outro fator é a influência da radiação. Na posição em que o termopar se encontra, há formação de uma barreira ou “sombra” provocada pela amostra, que diminui a influência da radiação tornando essa zona mais fria, como representado na Fig. (42).

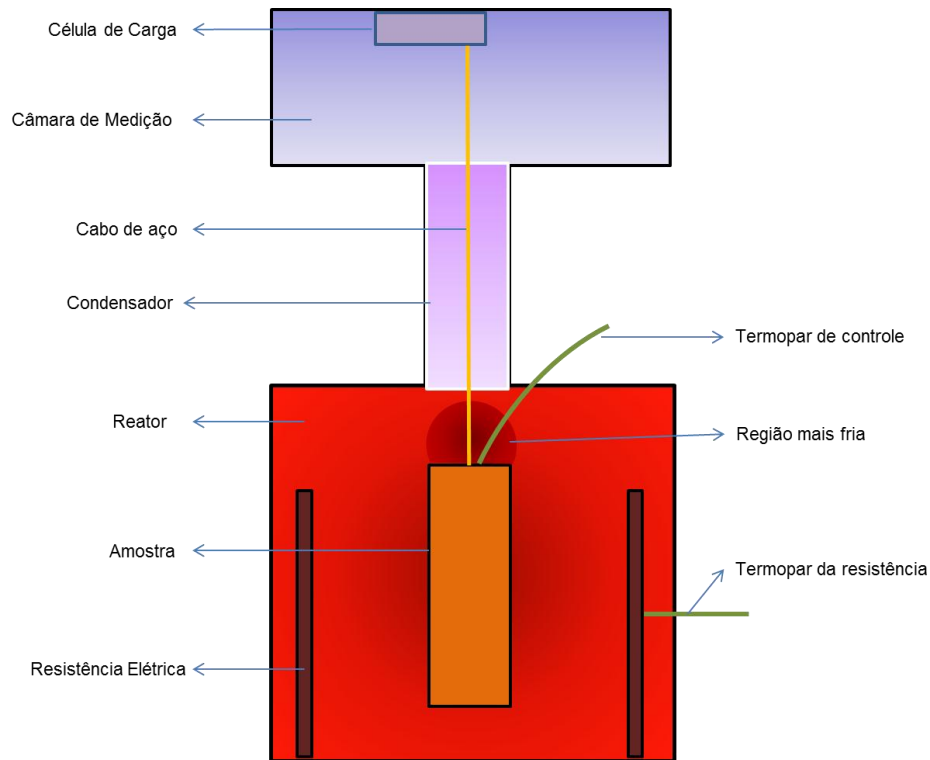


Figura 42. Zonas térmicas

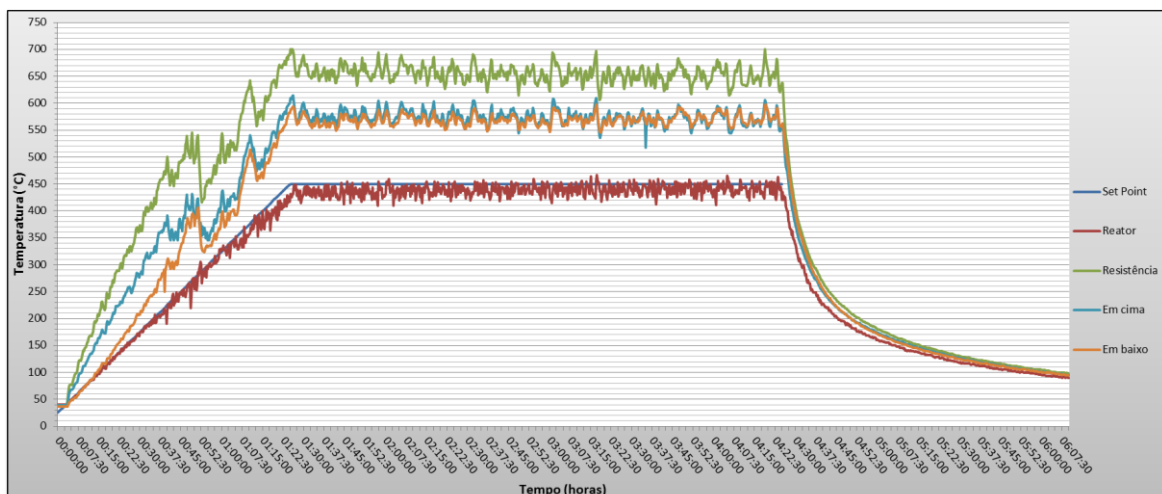


Figura 43. Teste N° 18 com posicionamento original dos termopares

Para que não fosse influenciado pela barreira térmica, o termopar foi reposicionado junto à lateral da amostra Fig. (44). Nessa região, além de se evitar a “sombra” gerada, existe

grande quantidade de convecção devido ao nitrogênio frio injetado e ao próprio ar aquecido pelas resistências. Com o reposicionamento, a temperatura obtida aproximou-se da temperatura do termopar inferior, indicando estar mais próxima do valor real. Mas ainda apresentou uma diferença significativa comparado com o termopar superior, por este estar próximo à tampa do reator que é uma zona onde não há isolamento térmico Fig.(45).

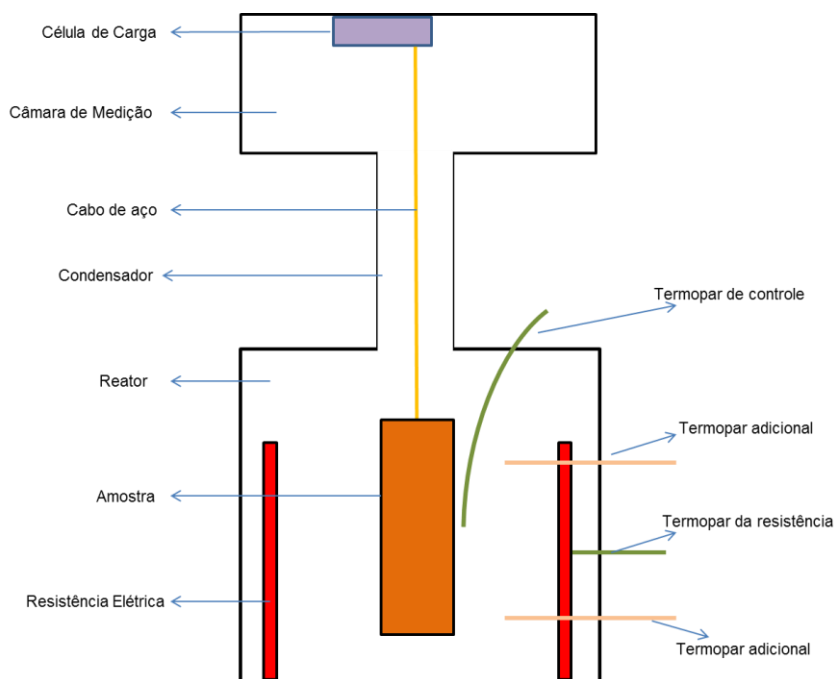


Figura 44. Reposicionamento do termopar de controle

Outro detalhe importante a ser observado são as oscilações que ocorrem em uma mesma curva. São devidas à dinamicidade do sistema, com injeção periódica de nitrogênio em baixa temperatura, pelas reações exotérmicas ocorrendo na biomassa fazendo elevar a temperatura do sistema. Assim, o controle PID é obrigado a fazer correções constantes dos parâmetros, acarretando nessas oscilações, porém garantindo valores médios dentro dos especificados.

Outro fenômeno que se percebe é uma brusca queda da temperatura em determinados momentos. Essas quedas não são falhas nas medições, sendo ocasionadas devido à condensação dos gases no interior do reator. Quando, por ventura, uma pequena gota de condensado caía em cima do termopar, este fará uma temperatura momentânea mais baixa. Porém, logo volta a medir um valor coerente. Essas oscilações poderão ser tratadas com o auxílio do LabView, gerando curvas mais suaves e melhor de serem analisadas.

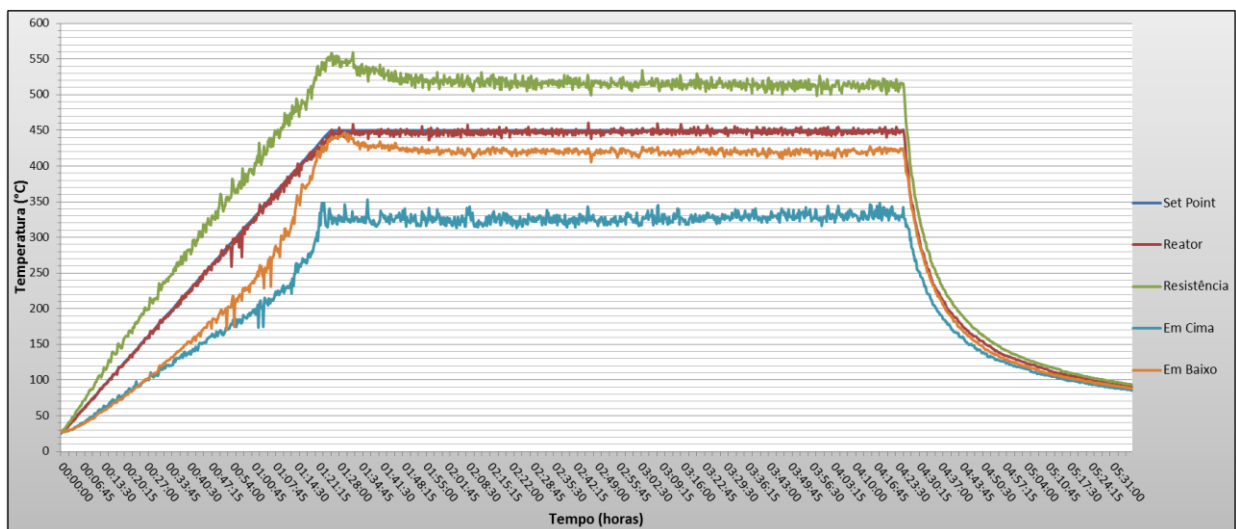


Figura 45. Teste N° 18.2 com reposicionamento dos termopares

Um sistema de isolamento térmico na tampa superior do reator foi proposto, a fim de diminuir as perdas que ali ocorrem e garantir menor oscilação de temperatura. Paralelamente, houve diminuição de correntes convectivas, pelo fato do canal de comunicação entre o reator e o condensador ser restringido a poucos milímetros, como observado na Fig.(46).

Para tanto, foi necessário uma junta de amianto usada em bloco de motores adaptada ao formato do reator. Com boa capacidade isolante e resistência à ambientes agressivos, sua utilização foi positiva nos experimentos. As diferenças de temperatura entre os termopares foram diminuídas, garantindo um controle preciso das condições internas do reator Fig.(47).

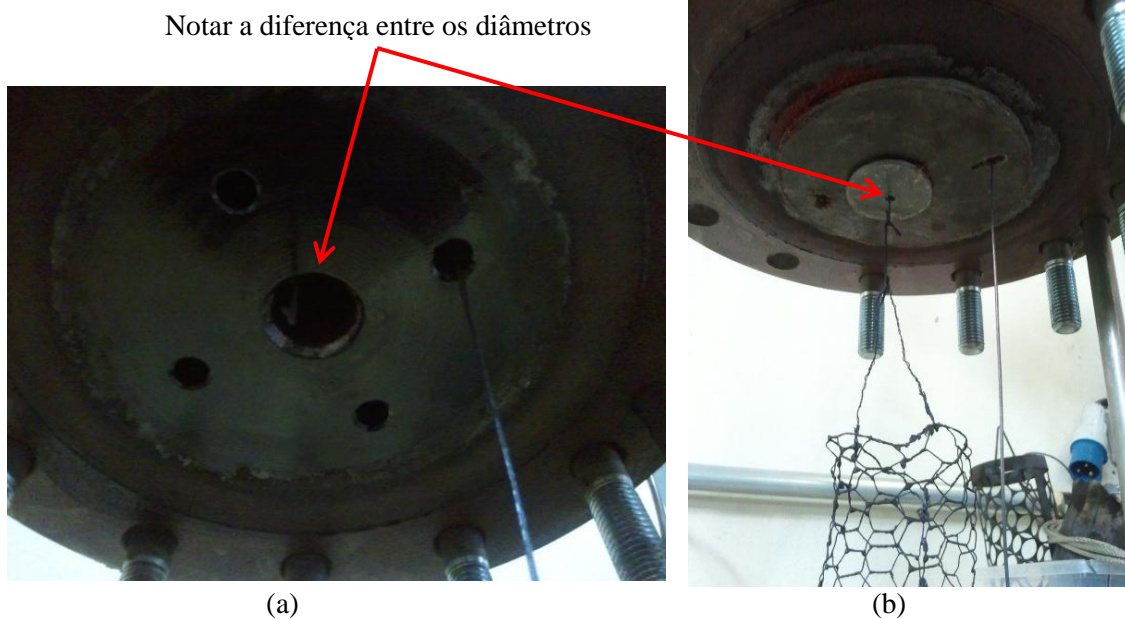


Figura 46. Colocação da junta isolante. Antes (a) e depois (b)

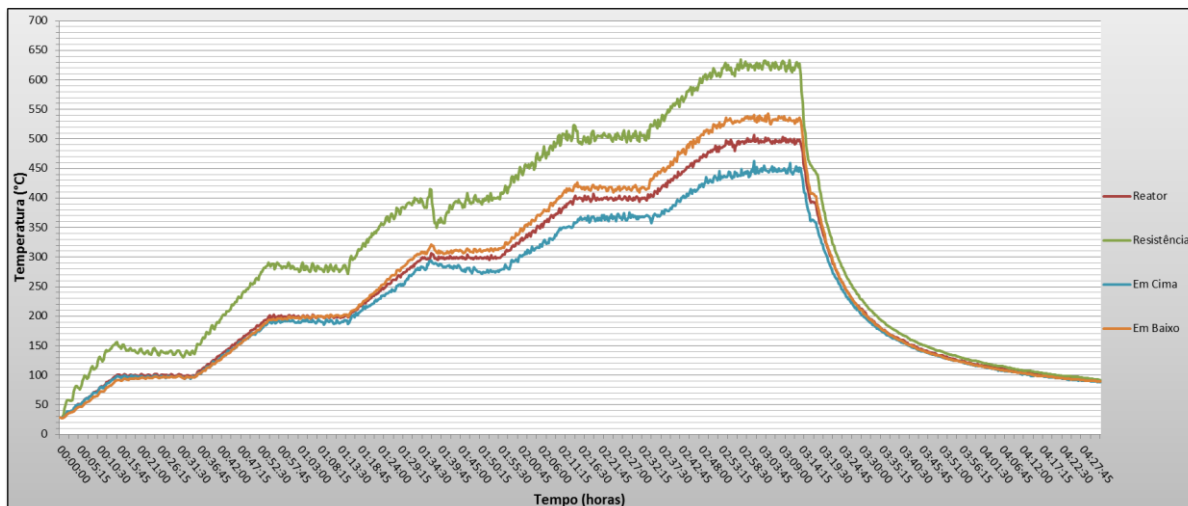


Figura 47. Teste com isolamento na tampa superior do reator

O teste de verificação com o isolamento térmico da tampa do reator mostra degraus de aquecimento variando de 100 em 100°C. Observa-se um acompanhamento quase coincidente das curvas de temperatura dos termopares de controle, e somente a partir de 300 °C há uma pequena variação, porém os valores obtidos pelo termopar do reator foram aproximadamente a média dos outros dois. O uso do isolante térmico se mostrou bastante eficiente, atentando-se somente ao seu posicionamento e fixação, que deverá ser feita através de cola resistente à temperatura elevada.

4.2 LINHA DE PRESSÃO

Diversas configurações são possíveis de serem feitas para a pressurização e controle do reator, porém cada uma apresenta mais ou menos problemas durante o seu funcionamento. Experimentos anteriores ao proposto apresentaram falhas semelhantes quanto ao controle de pressão.

Esses equipamentos faziam o controle da pressão por uma válvula que se encontrava na saída dos gases do reator, ver Fig.(49). Então, para um fornecimento de gás nitrogênio sempre aberto, à medida que a pressão no interior ultrapassasse a pressão desejada, ela atuava liberando os gases e diminuindo a pressão. O problema para essa configuração era que, na saída, os gases acabavam por condensar na válvula (temperatura mais fria) e a entupiam, inviabilizando a continuação dos experimentos. Uma medida para se evitar a condensação foi a utilização de fios térmicos que aqueciam a válvula em torno de 200 °C e impedia esse fenômeno. Porém, com uma alta temperatura, as válvulas acabavam queimando e tendo que ser substituídas por outras.

Ou seja, uma configuração com válvula de controle na saída dos reatores não era eficiente e passava a ser mais custoso devido às constantes trocas por novas válvulas.

A inovação proposta foi a de se fazer uso da válvula solenoide antes da entrada do reator, conforme ilustra a Fig.(48).

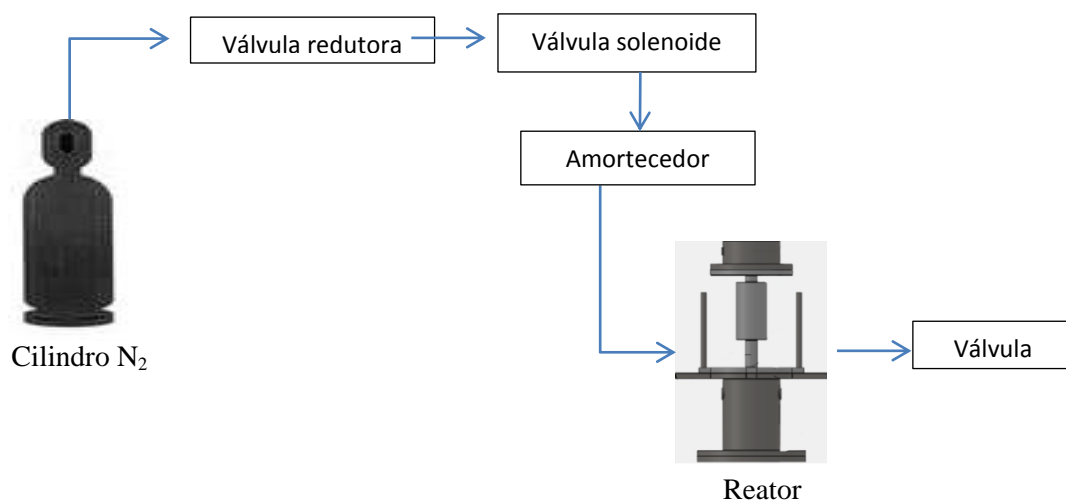


Figura 48. Esquema e montagem da linha de pressão

Agora não mais a saída de nitrogênio estará sempre aberta, e sim, a saída dos gases do reator, com uma vazão suficiente para garantir a pressurização. Através de medições realizadas com um medidor de fluxo foi possível estimar uma vazão na válvula de saída entre 2 a 5 litros por segundo (l/s) que garante a pressurização e um fluxo de gás ótimo. A válvula solenoide permanece aberta, permitindo a injeção de nitrogênio e consequentemente pressurizando o reator. Ao atingir a pressão estipulada, a válvula fecha, impedindo a entrada de mais N_2 . Assim, não há o problema de entupimento e nem da queima da válvula, pois trabalhará sempre com gás inerte a baixa temperatura. Para que essa configuração seja eficiente, a pressão à montante da válvula solenoide é ligeiramente superior à de trabalho, e há uma segunda válvula mecânica na saída do reator capaz de regular a vazão dos gases da reação.

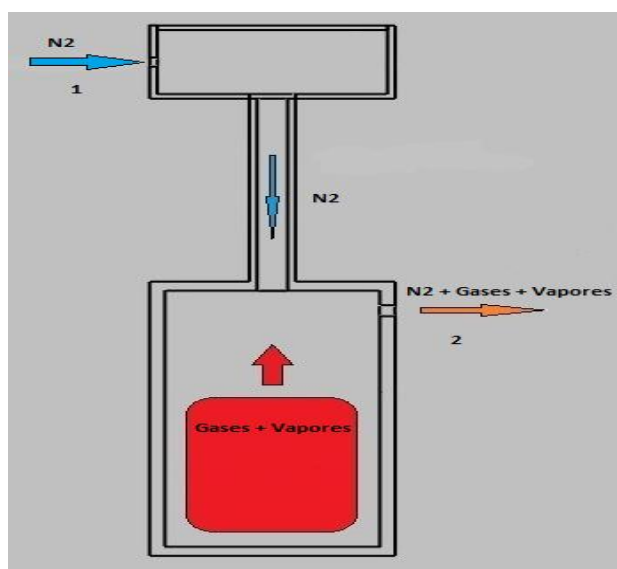


Figura 49. Esquema do sistema de pressurização (Colatto, 2011)

Assim, nota-se que a linha de pressão tem uma terceira função no funcionamento do reator. Além de garantir uma pressão constante de trabalho e uma atmosfera inerte pela injeção de nitrogênio, ela funciona como inibidora de contaminação da câmara de medição pelos gases das reações químicas. Ou seja, com a injeção de nitrogênio periodicamente na parte superior do reator, a tendência é que se tenha um fluxo descendente dos gases resultantes em direção à válvula de saída.

4.3 LINHA DE MASSA

Respeitando-se o que foi exposto no item 3.3.3, ensaios foram realizados para verificar o funcionamento e aquisição de dados da célula de carga. A TG tem como princípio o monitoramento da variação de massa, da amostra em estudo, em relação à programação controlada da temperatura e do tempo. Diferentemente de como acontece nas TGs convencionais, nestes ensaios foi utilizada uma quantidade de massa na ordem de centenas de gramas.

O caráter específico de uma sequência de reações físico-químicas que ocorrem em certas condições de temperatura, e em dada velocidade, é típica de um determinado composto ou sistema, representadas pelas curvas de decaimento. Além disso, a nova configuração de posicionamento da célula de carga foi testada, verificando sua integridade física, devido ao calor e à contaminação de gases agressivos, bem como se a coleta de dados ficou em conformidade com o que realmente acontece.

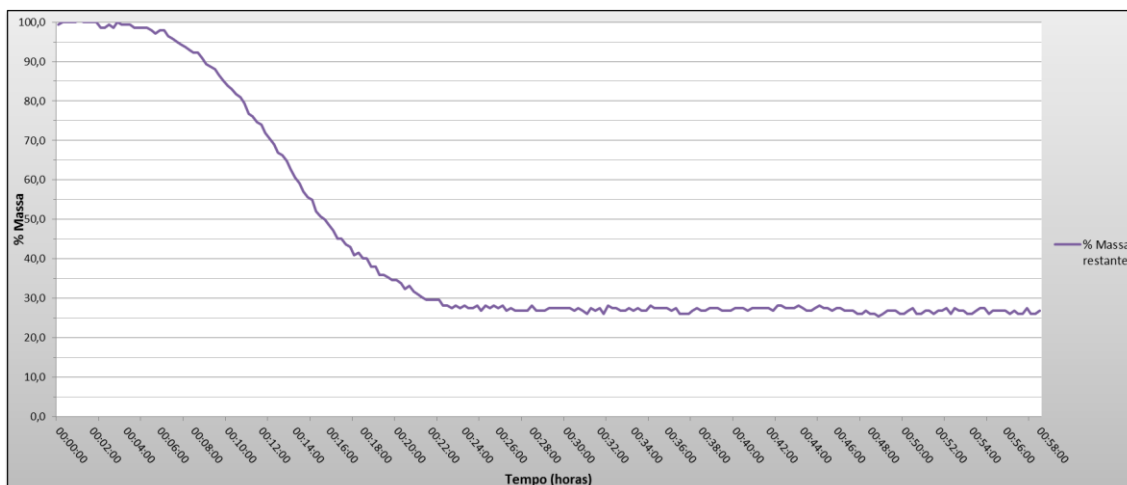


Figura 50. Teste N° 6 decaimento de massa percentual

A Fig.(50) mostra o decaimento de massa ao longo de um ensaio à pressão atmosférica, em um ambiente inerte, devido à injeção de nitrogênio dentro do reator. Com o passar do tempo e com o aumento de temperatura a biomassa em seu interior começa a se degradar termicamente, resultando em uma curva bem delineada. Para uma análise mais completa, é interessante mostrar a curva de decaimento de massa juntamente com o aumento de temperatura do reator, como visto na Fig.(51).

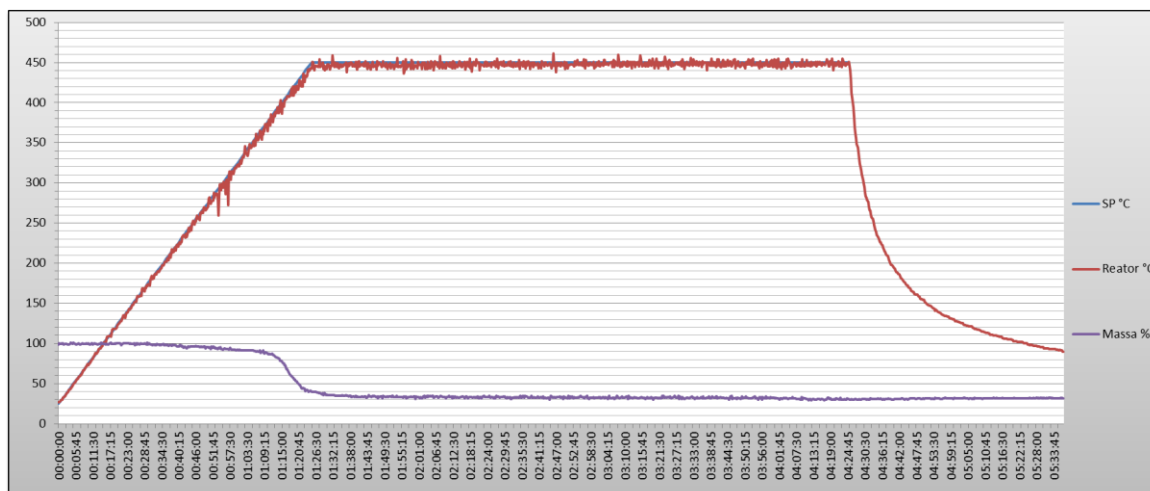


Figura 51. Teste N° 18 decaimento de massa percentual e temperatura do reator

Observa-se que a massa dentro do reator sofre transformações químicas liberando produtos que sairão junto com os gases do reator pela válvula de saída.

Ao final de inúmeros testes, a câmara de medição foi aberta para se verificar uma possível contaminação por gases corrosivos na célula de carga e também verificar se houve algum dano devido à temperatura. A Fig.(52) mostra a célula de carga após um ensaio, intacta, não apresentando quaisquer sinais de contaminação e nem danos. O condensador funcionou de maneira eficaz, fazendo com que a temperatura da câmara de medição não ultrapassasse os 35°C, temperatura essa bem inferior aos 50°C que a célula de carga suporta. O conceito de se injetar o nitrogênio na parte superior, acarretando um fluxo descendente dos gases, também corroborou para a não contaminação da célula de carga.

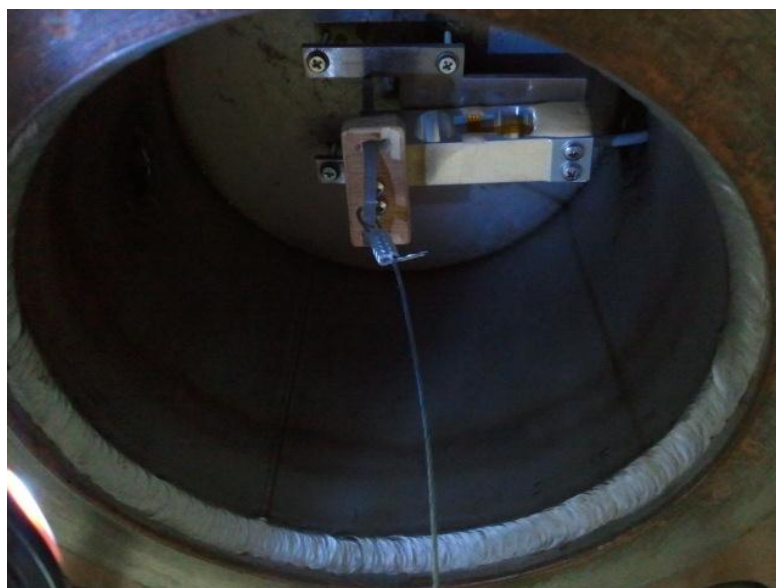


Figura 52. Célula de carga após realização de ensaios

5 CONCLUSÕES

A proposta inicial do Projeto de Graduação, no sentido de validar e implementar um sistema de controle para o equipamento, foi cumprida em um contexto mais geral. Foram testados todos os parâmetros considerados determinantes para a realização dos ensaios, como pressão, temperatura e massa. Essas três características passaram por algumas modificações no intuito de melhor atender às necessidades do projeto.

Concluiu-se que o novo conceito de se utilizar uma câmara separada para a célula de carga foi extremamente útil e eficaz, evitando contaminação e danos ao equipamento. A utilização de uma célula de carga mais sensível e precisa do que a utilizada nos ensaios poderá ser adaptada, visto que não foi possível fazê-la anteriormente devido às questões de segurança na operação.

A disposição das válvulas de controle e saída também se mostrou bastante funcional. A válvula de controle de entrada de nitrogênio não sofreu nenhum dano ou precisou ser substituída, diferentemente de projetos realizados anteriormente. A válvula de saída precisa ser melhorada, pois há acúmulo de depósito devido à realização contínua de ensaios. É necessária, portanto, uma limpeza periódica para garantir o seu bom funcionamento.

Referente ao sistema de controle, esse se mostrou bastante eficaz e confiável. Manteve uma repetitividade nas aquisições dos dados, independentemente das condições impostas, fazendo o controle dos parâmetros corretamente. Uma melhora na comunicação, utilizando-se do software LabView, não foi possível devido ao curto prazo disponibilizados e imprevistos ocorridos no curso do projeto. Essa interface viabilizaria uma melhora dos sinais adquiridos, bem como maior facilidade na operação por qualquer pessoa. A utilização e programação mais detalhada do software podem ser sugeridas para um trabalho futuro.

Dessa forma, o trabalho proposto foi cumprido, validando os diferentes parâmetros da máquina e necessitando apenas de refinamento em alguns aspectos. Além disso, novos conhecimentos foram adquiridos, contribuindo para o aprimoramento profissional.

6 SUGESTÕES

Uma vez pronto todo o sistema de automação e controle, com todos os equipamentos funcionando dentro dos parâmetros, recomenda-se para futuros trabalhos o aperfeiçoamento da comunicação com o software LabView, tornando-o mais abrangente e apto para qualquer tipo de ensaio realizado na balança. Um melhor tratamento dos sinais, no sentido de diminuir as oscilações nas curvas de temperatura e decaimento de massa, também se faz importante.

Recomenda-se, também, a adaptação de uma válvula de alívio na saída do reator, com o objetivo de se evitar pequenas oscilações da pressão quando a biomassa entra em uma fase exotérmica. Nessa fase, há liberação de grande quantidade de vapor, e uma válvula mecânica não é capaz de liberar esse excesso de gás, acarretando em um pequeno aumento da pressão. Já uma válvula de alívio é capaz de atuar aumentando ou diminuindo a vazão de gás e controlando a pressão no interior do reator.

Por fim, a construção de um painel elétrico é extremamente importante, tanto para a segurança da operação como pela praticidade. Todos os equipamentos de controle e a fiação poderão ser montados e colocados de maneira simples, facilitando a manipulação e futuras manutenções.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bastos Filho, J.G *Desenvolvimento de um forno metálico para carbonização da madeira*. 1988. 37 F. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

Colatto, I.V.W *Desenvolvimento de um termobalança pressurizada para testes de carbonização da madeira*. Universidade Brasília, Brasília, 2011.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. *Thermodynamics An Engineering Approach - 5th Edition*. McGraw-Hill Book Company, 2006.

Elias, C.A. *Fabricação de Carvão Vegetal*. Serviço de Informação Agrícola - Ministério da Agricultura. 43 p, 1961.

Figueiredo, C. K. *Dissertação de Mestrado - Análise Estatística do Efeito da Pressão na Carbonização da Madeira de Eucalyptus grandis*. Departamento de Engenharia Florestal , Universidade de Brasília , Brasília, 2009.

Figueiredo, C. K., Rousset, P., & Quirino, W. F. *Statistical Analysis of the Pressure Effect on the Charcoal Quality of Eucalyptus Grandis* . Brasília.

Figueiredo, C. K. *Dissertação de Mestrado - Análise Estatística do Efeito da Pressão na Carbonização da Madeira de Eucalyptus grandis*. Departamento de Engenharia Florestal , Universidade de Brasília , Brasília, 2009.

Heal, G. R. *Thermogravimetry and Derivative Thermogravimetry*. In: Haines, P. J. Principles of Thermal Analysis and Calorimetry. The Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK, 2002.

Ionashiro, M. *Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória*. Giz Editorial, Araraquara, Brasil, 2004.

Oliveira, E.de. 1988. *Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de Eucalyptus grandis (W. Hill ex-Maiden)*. Viçosa Minas Gerais, UFV, 47 p. Tese Mestrado.

Pimenta, A.S.; Barcellos, D.C.; Oliveira E. de. *Curso de Carbonização*. Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

Pinheiro, Paulo C.C.; Sampaio, Ronaldo S.; Rezende, Maria E. A. de; Bastos, José G. F. 2001. *Fundamentos e Prática da Carbonização de Biomassa*. Belo Horizonte: Primeiro Congresso Internacional de Uso de Biomassa Plantada para Produção de Metais e Geração de eletricidade.

Rousset, P. *Apresentação Eletrônica - A Carbonização da Madeira*. Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

Silva, B. S. *Curso de Controladores Lógico Programáveis*. Laboratório de Engenharia Elétrica, UERJ, Brasil.

Van Wyllen, G. J.; Richard, E.; Claus B. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. Trad. 4ª Ed. Americana Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo, Ed. Blucher, 1995.

Willard, H. Merrit Jr., L. Dean, J. *Análise Instrumental*. Trad. Maria Serpa dos Santos. 2ª ed. Fundação Kalouste Gulbenkian. Lisboa, Portugal, 1974. cap.17.

Revista brasileira de bioenergia - Centro Nacional de Referência em Biomassa.

ANEEL - *Atlas de Energia Elétrica do Brasil* - 2ª Edição em www.aneel.com.br

Artigo Técnico - *Controle PID Básico*, Novus Produtos Eletrônicos em www.novus.com.br

Visita em site da Agência Internacional de Energia - AIE (www.iea.org/) em Abril de 2012.

Visita em site (<http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5733/Apostila.pdf>) em Abril de 2012.

Visita em site (<http://www.xa.yimg.com/kq/groups/CursoDeCarbonizacao4.pdf>) em Maio de 2012.

Visita em site (<http://www.amcham.com.br/regionais/amcham-sao-paulo/noticias/2011/>) em Maio de 2012.

Visita em site ([http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)) em Junho de 2012.

Visita em site (<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr14/cap01.pdf>) em Maio de 2012.

ANEXO A

Cálculo da perda de calor na parede do reator (EES), após isolamento.

Programa para a estimativa da temperatura externa do reator e consequente perda de calor. Usando os dados da potência da resistência é possível estimar as perdas, sendo:

$$\text{Potência Resistência} = \text{Total de Perdas no reator}$$

Estimam-se as perdas por convecção natural e radiação na parte externa do reator quando este já estiver isolado termicamente.

a) Condições de Contorno:

1 - Temperatura constante

2 - Ensaio em laboratório, logo há convecção natural nas partes externas

b) Dados

$$\text{Potencia_Resistencia} = 1587 \text{ [W]}$$

$$\text{Espessura_Isolante} = 0,03 \text{ [m]}$$

$$\text{Diametro_Externo} = 0,16828 \text{ [m]} + (2 * \text{Espessura_Isolante})$$

$$\text{Altura_Total} = 0,3 \text{ [m]} + (2 * \text{Espessura_Isolante})$$

$$\{ \text{Temperatura_Externa_Reator} = ? \}$$

$$\text{Temperatura_Ambiente} = 293 \text{ [K]}$$

$$\text{Pressao_Ambiente} = 98 \text{ [KPa]}$$

c) Para convecção natural externa no reator

Fluid\$ = 'air'

Call FC_vertical_cylinder(Fluid\$, Temperatura_Externa_Reator;
Temperatura_Ambiente; Pressao_ambiente; Altura_Total; Diametro_Externo; h_Reator;
Nusselt_Reator; Ra_Reator)

Area_Reator = ((1,57*Diametro_Externo)^2) + (3,141*Altura_Total*Diametro_Externo)

Potencia_Convectiva = Area_Reator * h_Reator * (Temperatura_Externa_Reator -
Temperatura_Ambiente)

d) Para radiação no reator

Emissividade_Reator = 0,8 "Lã de vidro(Adaptado www.monarchinstrument.com) "

Constante_Stefan_Boltzmann = sigma#

Potencia_Radiotiva = Emissividade_Reator * Constante_Stefan_Boltzmann *
((Temperatura_Externa_Reator^4) - (Temperatura_Ambiente^4)) * Area_Reator

Potencia_Resistencia = Potencia_Convectiva + Potencia_Radiotiva

e) Resultados obtidos

Unit Settings: [kJ]/[K]/[kPa]/[kg]/[degrees]

Altura_Total = 0,36 [m]

Area_Reator = 0,3666 [m²]

Constante_Stefan_Boltzmann = 5,670E-08 [W/m²K⁴]

Diametro_Externo = 0,2283 [m]

Emissividade_Reator = 0,8

Espessura_Isolante = 0,03 [m]

Fluid\$ = 'air'

h_Reator = 5,962 [W/m²K]

Nusselt_Reator = 64,99

Potencia_Convectiva = 506 [W]

Potencia_Radiotiva = 1081 [W]

Potencia_Resistencia = 1587 [W]

Pressao_Ambiente = 98 [kPa]

Ra_Reator = 2,388E+08

Temperatura_Ambiente = 293 [K]

Temperatura_Externa_Reator = 512,6 [K]

ANEXO B

Data Sheet da célula de carga.

PW4MC3...

Single point load cells

Data Sheet

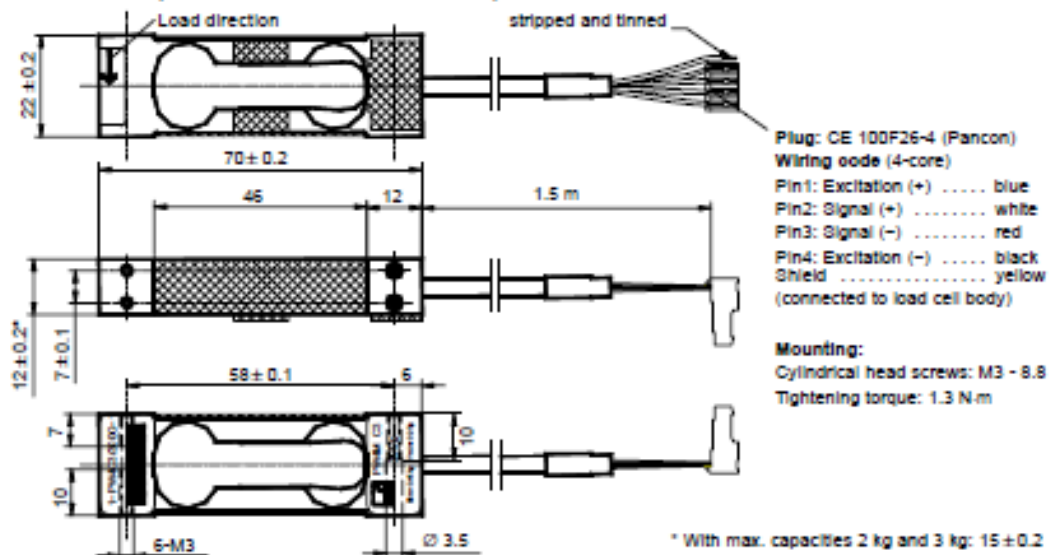


Special features

- For determining small masses
- Small size
- Accuracy class C3 with OIML-R60 test report
- Off center load compensated
- Degree of protection IP65 according to IEC 529
- Shielded connection cable



Dimensions (in mm; 1 mm= 0.03937 inches)



Specifications

Type	PW4MC3...				
Order-No.	1-PW4C3/300G-1	1-PW4C3/500G-1	1-PW4C3/2KG-1	1-PW4C3/3KG-1	
Accuracy class ¹⁾	C3				
Maximum number of load cell intervals (n_{LC})	3000				
Maximum capacity ²⁾ (E_{max})	g/kg	300	500	2	3
Minimum LC verification interval (V_{min})	g	0.05	0.1	0.2	0.5
Temperature effect on zero balance (TK ₀)	% of C_n / 10 K	0.0233	0.0280	0.0140	0.0233
Max. platform size	mm	200 x 200			
Sensitivity (C_n)	mV/V	1.0 ± 0.1		2.0 ± 0.2	
Zero signal	mV/V	0 ± 0.1			
Temperat. effect on sensitivity (TK _C) ³⁾ Temperature range: +20 ... +40 °C [68...104 °F] -10 ... +20 °C [14...68 °F]	% of C_n / 10 K	± 0.0175 ± 0.0117			
Hysteresis error (d_{hy}) ³⁾	% of C_n	± 0.0150			
Non-linearity (d_{lin}) ³⁾	% of C_n	± 0.0150			
Minimum dead load output return (MDLOR)	% of C_n	± 0.0245			
Off center load error ⁴⁾	% of C_n	± 0.0233			
Input resistance (R_{LC})	Ω	380 ± 38			
Output resistance (R_O)	Ω	380 ± 38			
Reference excitation voltage (U_{ref})	V	5			
Nominal range of excitation voltage (U_L)	V	1 ... 8			
Insulation resistance (R_{is}) at 100 V _{DC}	GΩ	> 2			
Nominal temperature range (B_T)	°C [°F]	-10 ... +40 [+14...+104]			
Operating temperature range (B_{T2})	°C [°F]	-10 ... +50 [+14...+122]			
Storage temperature range (B_S)	°C [°F]	-25 ... +70 [-13...+158]			
Limit load (E_L) ⁴⁾	% of E_{max}	150			
⁴⁾ at max. eccentricity	mm	100			
Lateral load limit (E_{L2}), static	% of E_{max}	200			
Breaking load (E_B)	% of E_{max}	> 300			
Deflection at E_{max} (s_{nom}), approx.	mm	< 0.4			
Weight, without cable (G), approx.	kg	0.07			
Degree of protection according to IEC529		IP65			
Material:		Aluminum			
Measuring element		Silicone rubber			
Coating		PVC			
Cable sheath					

1) In accordance to OIML R60 with $P_{LC} = 0.7$

2) Max. eccentric load according to OIML R76

3) The data for Non-linearity (d_{lin}), Hysteresis error (d_{hy}) and Temperature effect on sensitivity (TK_C) are typical values. The sum of these data meets the requirements according to OIML R60.

4) According to OIML R76

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only. They are not to be understood as express warranty and do not constitute any liability whatsoever.

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Im Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt, Germany
Tel.: +49 6151 803-0 Fax: +49 6151 803 9100
Email: support@hbm.com Internet: www.hbm.com



measurement with confidence

B2224-2.1 en